

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Абрамович Антон Олексійович

УДК 621.39.

**ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ ВИХРОСТРУМОВОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ
ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МЕТАЛЕВИХ ПРЕДМЕТІВ**

05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовини

05 "Технічні науки"

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А. О. Абрамович
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник:

Баженов Віктор Григорович кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Абрамович А.О. Удосконалення вихрострумового методу контролю для ідентифікації металевих предметів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовини». Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2021.

На сьогоднішній день в різних галузях науки, техніки, доглядовому контролі та військовій справі виникає потреба у виявленні та ідентифікації металевих об'єктів. Це пов'язано з пошуком вибухонебезпечних металевих предметів, комунікацій, визначення металу, з якого виготовлений невідомий об'єкт, ідентифікація знайдених самородків, в тому числі і прихованих. Для пошуку використовують електронні прилади (металошукачі), побудовані на реєстрації відмінності в електричних та магнітних властивостях прихованих предметів та середовища, в якому вони знаходяться. Такі прилади крім пошуку здійснюють попередню ідентифікацію металу. Вони визначають до якої підгрупи відноситься метал – до чорних металів чи кольорових. Металошукачі, які є вихрострумовою системою для виявлення металевих предметів, здійснюють дихотомічний аналіз металів, розділяють їх на дві великі підгрупи (чорних, кольорових) та не надають можливості визначити метал в межах підгруп, тобто не можуть відрізнити золото від алюмінію чи міді, нікель від сталі тощо.

Остаточна ідентифікація здійснюється лабораторним аналізом складу металевих об'єктів, для якого використовують хімічний, рентгено-флуоресцентний чи опто-емісійний методи. Вони вимагають наявності зразка металу і не дають змоги ідентифікувати його дистанційно (безконтактно). Крім того поверхня аналізованого об'єкту обов'язково має бути очищена від

забруднень. З цих причин лабораторний аналіз не завжди є прийнятним. У випадках, коли не потрібно встановлювати хімічний склад металевго об'єкту, а достатньо лише ідентифікувати метал, з якого виготовлено об'єкт, можна використовувати інші методи. Одним з таких методів, після певного доопрацювання, може бути вихрострумoвий метод виявлення металевих об'єктів, який належить до електромагнітних методів виявлення металів в діелектричному середовищі.

Великий внесок в розвиток цього методу внесли такі вчені як Маєвський С.М., Баженов В.Г., Любчик В.Р. Учанін В.М., Гальченко В.Я. та інші. Інтенсивно ведуться роботи і за кордоном, про що говорять матеріали міжнародних конференцій та публікації у міжнародних журналах. Захищено ряд дисертацій як в Україні, так і за кордоном. Це вчені Килимник О.М., Сватош Якуб та інші. Аналіз робіт показав, що ще не вдалося ідентифікувати об'єкти в середині підгруп чорних чи кольорових металів. Лабораторний аналіз не завжди прийнятний, а вихрострумoвий метод можна використовувати для побудови пристроїв експрес-тесту типу металу, в геофізичних дослідженнях, археології та у військовій справі.

В сучасних системах задача виявлення та ідентифікації металевих об'єктів покладається цілком на оператора. Це потребує врахування людського фактору та призводить до ускладнення ідентифікації виявленого об'єкту.

Таким чином, актуальною є задача удосконалення вихрострумoвого метода, шляхом розробки методів обробки сигналу вихрострумoвого пристрою та алгоритмічного і програмного забезпечення для реалізації дистанційної ідентифікації металів.

В **першому розділі** дисертації розглянуто існуючі принципи побудови аналізаторів металів (хімічний, рентгенівський та опто-емісійний) і вказано їхні недоліки, доцільність подальших досліджень та їх напрямки. Запропоновано використовувати вихрострумoву систему контролю для

аналізу металів та розробити методи обробки відбитого сигналу для створення нового типу аналізаторів металів.

Сформульовано постановку наукової задачі дослідження.

Для вирішення задачі виявлення та ідентифікації прихованих металевих об'єктів в діелектричних середовищах необхідно спочатку знайти об'єкт, а потім провести його аналіз в лабораторних умовах на спеціальних аналізаторах металів. Перший етап задачі здійснюється за допомогою металошукачів, а другий – аналіз, в лабораторних умовах.

Існує декілька методів такого аналізу. Найбільш розповсюджений хімічний метод, який побудований на розкладі досліджуваного матеріалу на атоми та молекули та подальшому дослідженню спектру отриманого від складових частин об'єкту. Це найбільш точний метод аналізу.

Зараз хімічний метод замінюється іншими, наприклад опто-емісійним, рентгенофлуоресцентним та іншими методами. Недоліками згаданих методів є менша точність, великі часові затрати, а поверхня об'єкту, що аналізується, обов'язково повинна бути очищена від фарби та іржі. Ці методи потребують наявності зразка металу і не дозволяють визначити його склад дистанційно (безконтактно), без лабораторних досліджень.

Тому задача виявлення та ідентифікації металевих предметів без їх ушкодження, в тому числі і прихованих в іншому діелектричному середовищі, є актуальною.

Радіолокаційні методи виявлення металевих об'єктів вперше були використані для знаходження вибухонебезпечних предметів, мін за допомогою вихрострумів перетворювачів (ВСП), які аналізують сигнал вихрострумів контролю відбитий від прихованого об'єкту.

Інформацію про досліджуваний об'єкт можливо виявити в амплітуді, фазі чи частоті сигналу, прийнятого "антенною", причому, як правило, тільки один з цих параметрів є інформативний, а інші заважаючими. Для виявлення та аналізу інформативного параметру у відбитому сигналі можна

використовувати амплітудний, фазовий та частотний методи обробки сигналу. Однак всі відомі методи дозволяють проводити аналіз складу металу за ознакою магнітний / немагнітний метал.

У **другому розділі** для ідентифікації складу металу пропонується розроблена спеціалізована цифрова електронна система, яка здійснює динамічне знімання сигналу вихрострумowego контролю.

В розробленій системі використовуються загальні принципи роботи типового вихрострумowego пристрою - металошукача, які доопрацьовані під динамічне знімання сигналу вихрострумowego контролю. У дослідженнях використано металеві об'єкти різної форми, які співрозмірні із "антенною" системи (мінімальний зразок 10x10x1 мм та максимальний 80x80x5 мм) і лише для такого діапазону розмірів результати дисертаційного дослідження є коректними!

Відбитий сигнал (відгук) вихрострумowego контролю, що виникає в результаті взаємодії випроміненого сигналу із металевим об'єктом несе інформацію, яка залежить від електричних та магнітних властивостей металу. Кожен метал має особливу фізичну природу і створює специфічний відбитий сигнал. Відбитий сигнал не є абсолютною характеристикою конкретного металу і залежить від ряду технічних факторів, що вимагають нормування траєкторії руху "антени" відносно об'єкта або навпаки - руху об'єкта відносно "антени". Тому у спроектованій експериментальній системі відбитий сигнал є його відносною характеристикою, яка стає абсолютною лише після порівняння різних металів і створення їх бази. Слід сказати, що зміна структури запропонованої системи контролю може впливати на відбиті сигнали. Це потребує не лише переналаштування бази металів за новими відбитими сигналами, а також внесення істотних змін в систему обробки інформації, що буде вимагати інших математичних методів обробки відбитого сигналу. Тому, технічна частина системи контролю і система

обробки інформації взаємно обумовлені і тісно зв'язані в єдиний апаратно-алгоритмічний комплекс.

Так, амплітуда сигналу наведеного від сталі значно менша за амплітуду сигналу наведеного від міді, що пояснюється різними електричними та магнітними властивостями металів. Це призводить до необхідності *нормування сигналу за амплітудою*.

Тривалість сигналу залежить від швидкості проходу пошукової "антени" над металевим об'єктом, яка повинна бути однаковою на всьому етапі контролю, тому виникає необхідність *нормування сигналу за тривалістю*.

Було створено макет цифрової універсальної програмованої системи контролю для отримання оцифрованих сигналів для забезпечення можливості подальшої їх обробки, з метою визначення ознак при ідентифікації металів.

У **третьому розділі** розроблено методи для ідентифікації металів у спектральній області та у часовій, визначено інформативні ознаки, за якими можна створювати базу образів металів. Перевірена та підтверджена можливість застосування метода лінійного передбачення для ідентифікації металів. Вказано недоліки спектрального методу.

Сигнал контролю описується дійсною функцією, а гармонічний склад сигналу в частотній області описується перетворенням Фур'є. В роботі пропонується оцінювати параметри сигналу за його спектральними характеристиками.

Окрім спектрального методу для ідентифікації металів можна використовувати метод лінійного передбачення, який використовується при обробці мовних сигналів. В дисертації вперше показана можливість застосування метода лінійного передбачення до сигналів для ідентифікації металів.

Проведено аналіз сигналів у часовій області, розроблено алгоритм перетворення часових сигналів у відповідний їм графічно-цифровий образ.

Метод графічно-цифрових образів полягає в тому, що для апроксимованого сигналу визначаються екстремальні значення сигналу та точки переходу його через нуль, які потім перетворюються в характерні лінії, що відрізняються одна від одної координатами, висотою та полярністю. Для цього апроксимовані часові сигнали нормуються за амплітудою так, щоб значення найбільшого екстремуму сигналу дорівнювало одиниці, а потім аналізуються апроксимуючі поліноми ділянок.

Часовий сигнал, отриманий експериментальною системою, перетворюється в графічно-цифровий образ, в якому неперервна зміна сигналу замінюється характерними лініями, що відповідають екстремумам сигналу. Графічні образи мають більшу інформаційну насиченість, ніж часовий сигнал, оскільки їхні характерні лінії чітко розрізняються координатами, висотою та полярністю. Крім того, графічний образ доповнюється точками переходу сигналу через нульовий рівень.

Сигнал, отриманий від різних металів, має різне розташування екстремумів і нульових точок, тому за їх значеннями можна ідентифікувати тип металу, з якого виготовлено об'єкт. Для аналізу металів потрібно створити образ об'єкту з невідомого металу, розрахувати його коефіцієнти та порівняти їх з тими, що вже є в базі даних, та знайти відповідний образ, тим самим визначивши тип металу.

У **четвертому розділі** описано методику проведення вимірювань та наведено результати розрізнення металів, які здійснені запропонованими методами.

Амплітуда сигналу контролю залежить від маси об'єкту, тому при дослідженні використовувалися амплітуди, приведені до маси об'єкту (питомі амплітуди). Питома амплітуда дозволяє порівнювати метали між собою, не прив'язуючись до їх розмірів.

Проведено порівняння відносної амплітуди з властивостями металів за таблицею Менделєєва та за теорією електронегативності Полінга-Бенсона,

яка відображає властивості атомів зв'язаних між собою хімічними зв'язками. Аналіз металів, оцінених за відбитими сигналами показав, що їх властивості не відповідають властивостям класичної таблиці Менделєєва, але добре співпадають з новою таблицею, яку введено у використання міжнародною комісією в 1989 році.

Таким чином, розглянуті методи дозволяють розрізнення металів в межах підгруп, тобто здійснення дистанційної ідентифікації металів.

Ключові слова: аналіз складу металів, система контролю, метод графічно-цифрових образів.

ABSTRACT

Abramovych A.O. Improving the eddy current control method for the identification of metal objects. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.11.13 "Devices and methods of control and determining the composition of the substance". – National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

Today, in various fields of science, technology, inspection and military affairs, there is a need to detect and identify metal objects. This is related to the search for explosive metal objects, communications, identification of the metal from which the unknown object is made, identification of found nuggets, including hidden ones. To search, use electronic devices (metal detectors), built on the registration of differences in electrical and magnetic properties of hidden objects and the environment in which they are located. Such devices, in addition to searching, carry out preliminary identification of the metal. They determine which subgroup the metal belongs to - ferrous or non-ferrous metals. Metal detectors,

which are an eddy current system for detecting metal objects, perform dichotomous analysis of metals, divide them into two large subgroups (black, colored) and do not provide the ability to identify metal within subgroups, ie can not distinguish gold from aluminum or copper, nickel from steel etc.

Final identification is performed by laboratory analysis of the composition of a metal object, which uses chemical, X-ray fluorescence or opto-emission methods. They require a metal sample and do not allow it to be identified remotely (contactless). In addition, the surface of the analyzed object must be cleaned of contaminants. For these reasons, laboratory analysis is not always acceptable. In cases where it is not necessary to establish the chemical composition of the metal object, but only to identify the metal from which the object is made, other methods can be used. One such method, after some refinement, may be the eddy current method of detecting metal objects, which belongs to the electromagnetic methods of detecting metals in a dielectric medium.

Such scientists as Maevsky S., Bazhenov V., Lyubchyk V., Uchanin V., Halchenko V. made a great contribution to the development of this method. and other. Intensive work is also being done abroad, as evidenced by the materials of international conferences and publications in international journals. A number of dissertations have been defended on this topic both in Ukraine and abroad - OM Kylymnyk, Yakub Svatos and others. Analysis of the work showed that it has not yet been possible to identify objects in the middle of subgroups of ferrous or nonferrous metals. Laboratory analysis is not always acceptable, and the eddy current method can be used to build rapid-type metal test devices in geophysical research, archeology, and military affairs.

In modern systems, the task of detecting and identifying metal objects rests entirely with the operator. This requires consideration of the human factor and leads to significant subjective errors in the identification of the material of the detected object.

Thus, the task of developing methods and means of eddy current control, including their algorithmic and software, which are able to ensure the identification of objects made of metal with high probability.

In the first chapter of the dissertation are considered the existing principles of construction of metal analyzers (chemical, X-ray and opto-emission) are considered and their shortcomings, expediency of further researches and their directions are specified. It is proposed to use an eddy current control system for metal analysis and to develop methods for processing the reflected signal to create a new type of metal analyzers.

Wording of the problem of scientific research is formulated.

To solve the problem of detecting and identifying hidden metal objects in dielectric media, it is necessary to first find the object, and then analyze it in the laboratory on special metal analyzers. The first stage of the problem is carried out with the help of metal detectors, and the second - analysis, in the laboratory.

There are several methods of such analysis. The most common chemical method, which is based on the decomposition of the studied material into atoms and molecules and the subsequent study of the spectrum obtained from the constituent parts of the object. This is the most accurate method of analysis.

Now the chemical method is replaced by other, such as opto-emission, X-ray fluorescence and other methods. The disadvantages of these methods are less accuracy, more time, and the surface of the object under analysis must be cleaned of paint and rust. These methods require the presence of a metal sample and do not allow to determine its composition remotely (non-contact), without laboratory tests.

Therefore, the task of detecting and identifying metal objects without damaging them, including those hidden in another dielectric medium, is relevant.

Radar detection methods for metal objects were first used to find explosive objects, mines using eddy current transducers (VSP), which analyze the eddy current control signal reflected from a hidden object.

Information about the object under study can be detected in the amplitude, phase or frequency of the signal received by the "antenna", and, as a rule, only one of these parameters is informative, and the others are interfering. To detect and analyze the informative parameter in the reflected signal is possible use amplitude, phase and frequency signal processing methods. However, all known methods allow the analysis of the composition of the metal on the basis of magnetic / non-magnetic metal.

In the second chapter, to identify the composition of the metal, a developed specialized digital electronic system is proposed, which performs dynamic recording of the eddy current control signal.

The developed system uses the general principles of operation of a typical eddy current device - a metal detector, which are modified for dynamic removal of the eddy current control signal. The research uses metal objects of different shapes, which are commensurate with the "antenna" of the system (minimum sample 10x10x1 mm and maximum 80x80x5 mm) and only for this range of sizes the results of the dissertation research are correct!

The reflected signal (response) of the eddy current control, which arises as a result of the interaction of the emitted signal with the metal object, carries information that depends on the electrical and magnetic properties of the metal. Each metal has a special physical nature and creates a specific reflected signal. The reflected signal is not an absolute characteristic of a particular metal and depends on a number of technical factors that require normalization of the trajectory of the "antenna" relative to the object or vice versa - the movement of the object relative to the "antenna". Therefore, in the designed experimental system, the reflected signal is its relative characteristic, which becomes absolute only after comparing different metals and creating their base. It should be noted that changing the structure of the proposed control system may affect the reflected signals. This requires not only the readjustment of the metal base for new reflected signals, but also significant changes in the information processing system, which will require

other mathematical methods of processing the reflected signal. Therefore, the technical part of the control system and the information processing system are mutually conditioned and closely connected in a single hardware-algorithmic complex.

Thus, the amplitude of the signal induced from steel is much smaller than the amplitude of the signal induced from copper, due to the different electrical and magnetic properties of metals. This leads to the need to *normalize the signal by amplitude*.

The duration of the signal depends on the speed of the search "antenna" over the metal object, which must be the same throughout the control stage, so it is necessary to *normalize the signal by duration*.

A model of a digital universal programmable control system was created to obtain digitized signals to enable their further processing, in order to determine the features in the identification of metals.

The third chapter developed methods for the identification of metals in the spectral and temporal regions, identified informative features that can create a database of images of metals. The possibility of applying the method of linear prediction for the identification of metals has been tested and confirmed. The disadvantages of the spectral method are indicated.

The control signal is described by a real function, and the harmonic composition of the signal in the frequency domain is described by a Fourier transform. The paper proposes to evaluate the parameters of the signal by its spectral characteristics.

In addition to the spectral method for the identification of metals, you can use the method of linear prediction, which is used in the processing of speech signals. In the dissertation for the first time the possibility of applying the method of linear prediction to signals for metal identification is shown.

The analysis of signals in the time domain is carried out, the algorithm of transformation of time signals into the corresponding graphic-digital image is developed.

The method of graphic-digital images consists in the fact that for the approximated signal the extreme values of the signal and its transition points are determined by zero, which are then converted into characteristic lines differing from each other by coordinates, height and polarity. For this, the approximate time signals are normalized by amplitude so, that the value of the maximum extremum of the signal is equal to one, and then the approximating polynomial sections are analyzed.

The time signal received by the experimental system is converted into a graphical-digital image in which the continuous change of the signal is replaced by characteristic lines corresponding to the extremums of the signal. Graphic images have a greater informational saturation than a time signal, since their characteristic lines clearly differ in coordinates, height and polarity. In addition, the graphic image is supplemented by points of signal transition through zero level.

The signal received from different metals has a different location of extremums and zero points, so their values can identify the type of metal from which the object is made. For the analysis of metals it is necessary to create an image of an object from an unknown metal, calculate its coefficients and compare them with those already in the database, and to find the corresponding image, thus determining the type of metal.

The fourth chapter describes the methodology for conducting measurements and presents the results of the distinguishing metals that are made by the proposed methods.

The amplitude of the control signal depends on the mass of the object, so the study used the amplitudes reduced to the mass of the object (specific amplitudes). The specific amplitude allows you to compare metals with each other without being tied to their size.

A comparison of the relative amplitude with the properties of metals by the Mendeleev table and the theory of Pauling-Benson's electronegativity, which reflects the properties of atoms of linked chemical bonds, is carried out. The analysis of metals evaluated by reflected signals showed that their properties did not correspond to the properties of the classical Mendeleev table, but coincide well with the new table introduced by the international commission in 1989.

Thus, the considered methods allow the differentiation of metals within the subgroups, that is, the implementation of remote analysis of the composition of the metal.

Keywords: analysis of metals, control system, method of graphic-digital images.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Абрамович А.О. Металодетектори / А.О. Абрамович, С.М. Дяченко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – Київ. – 2011. – Вип. №46. – С. 186-193.

Здобувачем проведено огляд існуючих методів виявлення металів.

2. Абрамович А. О. Радіолокаційно-вихрострумний радар / А. О. Абрамович // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – Київ. – 2014. – Вип. №57. – С. 77-82.

Здобувачем розроблено теоретичні засади експериментального радіолокаційно-вихрострумового радара, на основі яких була виготовлена експериментальна РСБЛ для проведення вимірювань.

3. Правда В. І. Георадари / В. І. Правда, О. Д. Мрачковський, А. О. Абрамович // Вісник національного університету “Львівська політехніка”, Серія : радіоелектроніка та телекомунікації. – Львів. – 2015. – № 818 – С. 49-54. **(Index Copernicus)**

Здобувачем проведено огляд існуючих георадарів та вказано перспективні напрями їх подальшого розвитку - радіолокаційно-вихрострумовий метод..

4. Абрамович А. О. Дихотомічне розрізнення металу на чорний-кольоровий за допомогою спектрального аналізу / А. О. Абрамович, О. Д. Мрачковський, В.Ю. Фурманчук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Сер: Технічні науки. – Житомир. – 2017. – Вип. №1(79). – С. 48-51.

Здобувачем розроблено інформативні ознаки у сигналі радіотехнічної системи ближньої локації для дихотомічного розрізнення металів (за ознакою магнітний / немагнітний).

5. Abramovych A.O. Application of spectral analysis for distinguishing metals by signals from eddy current converters / A.O. Abramovych, V.O. Poddubny // The East European Journal of Advanced Technology. – Kharkiv.– 2017. Vol. 89 (No. 5). P. 51 – 57 DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110177> **(Scopus)**

Здобувачем розроблено інформативні ознаки у сигналі радіотехнічної системи ближньої локації для розрізнення металів в спектральній області в середині підгруп немагнітних та магнітних металів.

6. Абрамович А.О. Дистанційний вихорострумовий аналіз складу металевих об'єктів / А.О. Абрамович, В.О. Піддубний, І.С. Каширський // Міжнародний науково-технічний журнал «Металофізика та новітні

технології». – Київ. – 2017. Том.39 Вип. №8. – С. 1035-1049. URL: <http://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v39/i08/1035.html> (**Scopus**)

Здобувачем розроблено інформативні ознаки у сигналі радіотехнічної системи ближньої локації для розрізнення металів в часовій області в середині підгруп немагнітних та магнітних металів та запропоновано метод графічно-цифрових образів.

7. Abramovych A. O. Rationing of signals of eddy – current converters for correct comparison of them / A. O. Abramovych, V. O. Poddubny // Bulletin of the Ternopil National Technical University. Ser: Technical sciences. –Ternopil. – 2017. – Volume 86 (№2). – P.76-83.

Здобувачем розроблено алгоритм пошуку інформативних максимумів в сигналі для його нормування за тривалістю для зручності подальшої обробки.

8. Абрамович А.О. Метод обработки отраженных сигналов вихретоковых импульсных преобразователей / А.О. Абрамович, В. О. Піддубний, І.С. Каширський // Науковий вісник Запорізького національного технічного університету, Радіоелектроніка, інформатика, управління. – Запоріжжя. – 2017. – Вип. №4. – С.7–14. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-4-1> (**Web of science**)

Здобувачем розроблено структурну схему РСБЛ на якій використані спектральний та метод графічно-цифрових образів.

9. Абрамович А.О. Вихрострумовий пристрій з базою даних образів для ідентифікації типів металів прихованих об'єктів / А.О. Абрамович, В. О. Піддубний, О. М. Гусляков // Науково технічний журнал "Озброєння та військова техніка". – Київ . – 2017. – №3(15). – С. 51–56.

Здобувачем запропоновано створити базу даних образів металевих виробів, яку можна використовувати при розмінуванні територій.

10. Abramovych A. O. Radio engineering system identification of metals on the basis of eddy-current converters / A. O. Abramovych, Y. S. Agalidi, V. O.

Piddubnyi // Scientific Bulletin of Zaporizhzhya National Technical University, Radioelektronika, Informatics, Management. – Zaporizhzhia. – 2020. – №1. – P. 7-17. **(Web of science)** DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-1-1>

Здобувачем розглянуто фізичні ефекти та запропоновано пояснення причини виникнення сигналу контролю, який обробляється системою для ідентифікації металів.

11. Абрамович А.О. Вихорострумний амплітудно-фазовий метод ідентифікації провідних (металевих) об'єктів / А. О. Абрамович, В. О. Піддубний // Міжнародний науково-технічний журнал «Металофізика та новітні технології». – Київ – 2020. – Том 42. – Вип. №8. – С. 1169-1185. **(Scopus)** URL: <http://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v42/i08/1169.html>

Здобувачем запропоновано математичну модель, що дозволяє отримати теоретичні сигнали, подібні до експериментально вимірних. Показано перспективи та подальші шляхи розвитку даного моделювання сигналів контролю відгуків від різних металів.

12. Abramovych A. Eddy-current system for identification of metal objects / A. Abramovych, V. Bazhenov, V. Piddubnyi // Sciences of Europe. – Praha, Czech Republic – 2020. – Vol 1. – №56. – p. 44-53. **(IndexCopernicus)**

Здобувачем здійснено порівняння розроблених методів обробки сигналу відгуку. Показано можливості розроблених методів для ідентифікації металів при зашумленні сигналів відгуків.

Свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір:

13. А. с. № 70479 Метод виявлення металевих предметів у діелектричному середовищі / А. О. Абрамович (Україна); заявк. 22.12.2016, опубліковано 16.02.2017

Здобувачем запропоновано метод виявлення металевих предметів у діелектричному середовищі на основі поєднання радіолокаційного та вихрострумowego методу обробки сигналу.

14. А. с. № 70945 Спосіб розрізнення металів на чорні та кольорові з використанням коефіцієнтів лінійного передбачення за даними металошукача на основі вихрових струмів: / А.О. Абрамович, С. Я. Жук (Україна); заявк. 24.01.2017, опубліковано 16.03.2017

Здобувачем запропоновано використання методу лінійного передбачення для розрізнення металів за ознакою магнітний / немагнітний по сигналам радіотехнічної системи ближньої локації.

15. А. с. № 73585 Часовий метод виявлення металевих об'єктів у діелектричному середовищі / А.О. Абрамович, В.О. Піддубний, І. С. Каширський (Україна); заявк подано. 20.06.2017, опубліковано 28.08.2017

Здобувачем запропоновано метод графічно-цифрових образів для розрізнення металів в часовій області по сигналам РСБЛ.

Тези доповідей:

16. Абрамович А.О. Модифікована радіотехнічна система ближньої локації для ідентифікації прихованих металів / А. О. Абрамович, В. О. Піддубний // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2018. – С. 176 – 178.

Здобувачем запропонована модифікована РСБЛ.

17. Абрамович А.О. Металодетектори / А.О.Абрамович, С.М. Дяченко // Матеріали V науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Радіoeлектроніка в ХХІ столітті». – Київ. – 2011. – С. 140 – 141.

Здобувачем здійснено огляд існуючих типів металодетекторів та вказано перспективні напрямки – створення радіотехнічної системи ближньої локації для виявлення металів.

18. Абрамович А.О. Вибрані аспекти математичної обробки сигналів георадарів / А.О. Абрамович // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2013. – С. 111 – 112.

Здобувачем запропоновано окремі аспекти по обробці сигналів георадарів.

19. Абрамович А.О. Радіолокаційно-вихрострумний метод обробки сигналів георадарів / А.О. Абрамович // Матеріали науково-технічної конференції "Фізика, електроніка, електротехніка". – Суми. – 2013. – С. 148.

Здобувачем запропоновано поєднання радіолокаційного та вихрострумного методів обробки відбитого сигналу георадара.

20. Абрамович А.О. Радіолокаційно-вихрострумний метод виявлення металів / А.О. Абрамович, І.О. Товкач // Матеріали науково-технічної конференції "Фізика, електроніка, електротехніка". – Суми. – 2014. – С. 167.

Здобувачем запропонована структурна схема радіолокаційно-вихрострумного радара.

21. Абрамович А.О. Георадар для пошуку та класифікації металів / А. О. Абрамович // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2014. – С. 144 – 146.

Здобувачем здійснено огляд існуючих георадарів та вказано їх перспективні напрямки в питанні пошуку та класифікації металів.

22. Абрамович А.О. Метод графічних образів в радіотехнічній системі ближньої локації / А.О. Абрамович, І.С. Каширський, В. О. Піддубний // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2018. – С. 173 – 175.

Здобувачем розроблено метод графічно-цифрових образів, що полягає у заміні сигналу в часовій області відповідними його графами амплітуд на основі радіотехнічної системи ближньої локації.

23. Абрамович А. О. Класифікаційна ознака у сигналі георадара, що дозволяє розрізняти конкретний тип металу / А. О. Абрамович // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2015. – С. 142 – 144.

Здобувачем запропонована класифікаційна ознака у сигналі георадара, що дозволяє розрізняти метали.

24. Абрамович А.О. Виявлення в сигналі георадара класифікаційних ознак для розрізнення кольорових металів / А.О. Абрамович // Матеріали науково-технічної конференції "Фізика, електроніка, електротехніка". – Суми. – 2015. – С. 154

Здобувачем розроблена методика визначення класифікаційних ознак у сигналі георадара для розрізнення кольорових металів між собою.

25. Абрамович А.О. Экспериментальное исследование возможности дихотомического различия черных и цветных металлов по данным металлоискателя на основе вихревых токов методом линейного предсказания / А.О. Абрамович, С.Я. Жук, О.Д. Мрачковский // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2016. – С. 14 – 16.

Здобувачем запропоновано використовувати метод лінійного передбачення для дихотомічного розрізнення металів по сигналам радіотехнічної системи ближньої локації.

26. Абрамович А.О. Розпізнавання металевих об'єктів за допомогою аналізу сигналу металошукача в часовій області / А.О. Абрамович // Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій". – Тернопіль. – 2016. – С. 92 – 93.

Здобувачем запропоновано розпізнавати метали на основі аналізу характеристик форми сигналу у часовій області, на основі використання радіотехнічної системи ближньої локації.

27. Абрамович А.О. Металодетектор за принципом дії BFO / А.О. Абрамович // Матеріали IV науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Радіoeлектроніка в XXI столітті". – Київ. – 2010. – С. 245-247.

Здобувачем проаналізовано принцип побудови металодетекторів за принципом BFO та вказано перспективні напрямки їх використання .

28. Абрамович А.О. Нормування сигналу металоаналізатора для застосування методу лінійного передбачення / А.О. Абрамович // Матеріали науково-технічної конференції "Фізика, електроніка, електротехніка" – Суми. – 2017. – С. 137.

Здобувачем розроблений алгоритм нормування сигналів радіотехнічної системи ближньої локації для зручного їх порівняння між собою.

29. Абрамович А.О. Вихрострумний металошукач із спектральною обробкою сигналу / А.О. Абрамович, О.Д. Мрачковський, В.О. Піддубний // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2017. – С. 14 – 16.

Здобувачем запропоновано в спектральній області нові інформативні ознаки: площу під обвідною та форму обвідної.

30. Абрамович А.О. Распознавание металлических объектов с помощью анализа временных сигналов / А.О. Абрамович, І.С. Каширський, О. Д. Мрачковський // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2017. – С. 14 – 16.

Здобувачем запропоновано новий інформативний параметр $K\%$ для розрізнення металів в часовій області по сигналам радіотехнічної системи ближньої локації.

31. Абрамович А.О. Накопичення бази даних образів про металеві предмети, як метод підвищення ефективності металошукачів / А.О. Абрамович, В.О. Піддубний, С.А. Цибуля // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції "Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ". – Львів. – 2017. – С. 256 – 257.

Здобувачем запропоновано накопичення бази образів різних металевих виробів для їх аналізу радіотехнічною системою ближньої локації.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Вступ..... | 27 |
| Розділ 1. Огляд методів та засобів визначення складу металів | 35 |
| 1.1. Радіотехнічні системи як детектори та аналізатори металів, їх актуальність..... | 35 |
| 1.2. Огляд принципів побудови детекторів та аналізаторів складу металів..... | 36 |
| 1.2.1. Огляд контактних методів аналізу складу металів | 37 |
| 1.2.2. Огляд металодетекторів (простих аналізаторів металів) побудованих на взаємодії електромагнітного поля та металу..... | 39 |
| 1.2.2.1. Металодетектори з одним автогенератором..... | 40 |
| 1.2.2.2. Металодетектори типу BFO (Beat Frequency Oscillation – генератор биттів)..... | 41 |
| 1.2.2.3. Металодетектори TR/IB (Transmitter Receiver / Induction Balance)..... | 44 |
| 1.2.3. Фактори, що впливають на вихідний сигнал металодетекторів..... | 45 |
| 1.3. Останні наукові досягнення та невирішені питання в області ідентифікації металів вихрострумовими пристроями..... | 47 |
| 1.4. Мета і завдання даних наукових досліджень..... | 50 |
| Розділ 2. Удосконалення вихрострумового методу та засобу контролю для ідентифікації металів | 52 |
| 2.1. Динамічний вихрострумовий метод контролю типу металів..... | 52 |
| 2.1.1. Котушки як "антенні" системи вихрострумових пристроїв..... | 56 |
| 2.2. Принцип роботи цифрової системи для аналізу металів | 62 |
| 2.3. Розробка алгоритму нормування вхідних сигналів, програмне управління системою..... | 65 |
| 2.4. Стадії підготовки системи до ідентифікації металів | 72 |
| Висновки до розділу 2..... | 73 |

| | |
|--|-----|
| Розділ 3. Розроблення методів розпізнавання металів по сигналах вихрострумowego контролю | 74 |
| 3.1. Розпізнавання складу металів в спектральній області..... | 74 |
| 3.1.1. Спектральний метод аналізу сигналів відгуків від металів..... | 74 |
| 3.1.2. Різниця у спектрах сигналів, отриманих від різних металів..... | 82 |
| 3.2. Існуючі методи обробки сигналів, подібних до експериментальних..... | 90 |
| 3.3. Застосування методу лінійного передбачення для дихотомічного розрізнення металів..... | 91 |
| 3.3.1. Особливості методу лінійного передбачення..... | 91 |
| 3.3.2. Класифікація об'єкту..... | 93 |
| 3.3.3. Опис навчальної вибірки класів об'єктів – таблиці магнітних та немагнітних металів..... | 94 |
| 3.4. Розпізнавання складу металів в часовій області | 99 |
| 3.4.1. Аналіз сигналів в часовій області диференційним методом..... | 100 |
| 3.4.2. Пошук коренів стандартними методами Matlab..... | 105 |
| 3.5. Аналіз впливу розмірів зразків металів на сигнал відгуку..... | 107 |
| 3.6. Ідентифікація апроксимуючої функції..... | 110 |
| 3.7. Порівняння результатів, отриманих спектральним та часовим методами..... | 117 |
| Висновки до розділу 3..... | 120 |
| Розділ 4. Експериментальне дослідження складу металів..... | 122 |
| 4.1. Методика проведення експериментів..... | 122 |
| 4.1.1. Оцінювання потенційних можливостей вимірювального каналу системи..... | 124 |
| 4.2. Результати дослідження сигналів системи при роботі із магнітними металами..... | 125 |
| 4.3. Результати дослідження сигналів системи при роботі із не магнітними металами..... | 130 |

| | |
|--|-----|
| 4.4. Результати та їх обговорення..... | 144 |
| 4.5. Дослідження електромагнітної природи відбитого сигналу..... | 147 |
| 4.5.1. Розрахунок глибини проникнення..... | 147 |
| 4.5.2. Питома амплітуда металів..... | 148 |
| 4.5.2.1 Вплив товщини зразка на відбитий сигнал..... | 148 |
| 4.5.2.2. Вплив магнітних властивостей зразка на відбитий сигнал..... | 150 |
| 4.5.2.3. Питома амплітуда..... | 150 |
| 4.6. Порівняння методів для задачі аналізу металів..... | 155 |
| Висновки до розділу 4..... | 157 |
| Висновки | 159 |
| Список використаних джерел..... | 162 |
| Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації..... | 175 |
| Додаток Б. Акти впровадження результатів дисертації..... | 183 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВСП – вихрострумний перетворювач;

ВО – вимірювальна обмотка;

КВ – котушка вимірювальна;

ЕМ – електромагнітна хвиля;

ЕОМ – електронна обчислювальна машина;

M_n – математичне очікування нижньої частоти смуги сигналу;

M_v – математичне очікування верхньої частоти смуги сигналу;

S_n – дисперсія нижньої частоти смуги сигналу;

S_v – дисперсії верхньої частоти смуги сигналу;

M – математичне очікування площі спектру;

S – дисперсія площі спектру;

$K\%$ – параметр відсоткової різниці між двома найбільшими позитивними максимумами відбитого сигналу;

РС – радіотехнічна система.

ВСТУП

На сьогоднішній день в різних галузях науки, техніки та військовій справі виникає потреба в виявленні та ідентифікації металевих об'єктів. Це пов'язано з пошуком вибухонебезпечних металевих предметів, комунікацій, визначення металу, з якого виготовлений невідомий об'єкт, ідентифікація знайдених самородків, в тому числі і прихованих. Для пошуку використовують електронні прилади (металошукачі), побудовані на реєстрації відмінності в електричних та магнітних властивостях прихованих предметів та середовища, в якому вони знаходяться. Такі прилади крім пошуку здійснюють попередню ідентифікацію металу. Вони визначають, до якої підгрупи відноситься метал: чорних металів чи кольорових. Тобто металошукачі, які є по суті радіотехнічною системою (РС) для виявлення металевих предметів, здійснюють дихотомічний аналіз металів, розділяють їх на дві великі підгрупи (чорних, кольорових) та не мають можливості визначити метал в межах підгруп, тобто не можуть відрізнити золото від алюмінію чи міді, нікель від сталі.

Остаточна ідентифікація здійснюється лабораторним аналізом складу металевого об'єкту, для якого використовують хімічний, рентгено-флуоресцентний чи оптико-емісійний методи. Вони вимагають наявності зразка металу і не дозволяють ідентифікувати його дистанційно (безконтактно). Поверхня об'єкту, що аналізується, обов'язково повинна бути очищена від забруднень. Лабораторний аналіз не завжди прийнятний. В випадках, коли не потрібно встановлювати хімічний склад металевого об'єкту, а достатньо лише ідентифікувати метал, з якого виготовлено об'єкт, можна використовувати інші методи ідентифікації. Одним з таких методів, після певного доопрацювання, може бути вихрострумовий метод виявлення металевих об'єктів, який є електро-магнітним методом виявлення металів в діелектричному середовищі.

Великий внесок в розвиток цього методу внесли такі вчені як Маєвський С.М., Баженов В.Г., Любчик В.Р. Учанін В.М., Гальченко В.Я. та інші. Інтенсивно ведуться роботи і за кордоном, про що говорять матеріали міжнародних конференцій та публікації у міжнародних журналах. Захищено ряд дисертацій як в Україні, так і за кордоном. Це вчені Килимник О.М., Сватос Якуб та інші. Аналіз робіт показав, що ще не вдалося ідентифікувати об'єкти в середині підгруп чорних чи кольорових металів. Лабораторний аналіз не завжди прийнятний, а вихрострумний метод можна використовувати для побудови пристроїв експрес-тесту типу металу, в геофізичних дослідженнях, археології та у військовій справі.

В сучасних системах задача виявлення та ідентифікації металевих об'єктів покладається цілком на оператора. Це потребує врахування людського фактору та призводить до ускладнення ідентифікації виявленого об'єкту.

Таким чином, актуальною є задача удосконалення вихрострумного методу, шляхом розробки методів обробки сигналу вихрострумного пристрою та алгоритмічного і програмного забезпечення для реалізації дистанційної ідентифікації металів.

Науковою задачею, розглянутою в дисертації, є удосконалення вихрострумного методу аналізу металів з використанням електронної системи контролю.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана в НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» на кафедрах «Радіотехнічних пристроїв та систем» радіотехнічного факультету та «Приладів і систем неруйнівного контролю» приладобудівного факультету, також виконано ініціативну науково-дослідну роботу «Дослідження можливості застосування кепстрального аналізу сигналів металошукача з метою дихотомічного визначення типу металу», номер державної реєстрації 0116U006188 (2016 рік).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є забезпечення ідентифікації металів всередині підгруп магнітних / немагнітних на основі удосконалення вихрострумowego методу контролю.

Відповідно до мети, *основними завданнями* дослідження є:

1. Аналіз сучасного стану методів ідентифікації металу у виробках з різними невідомим мас-габаритними характеристиками та обґрунтування вихрострумowego методу для реалізації цього завдання.

2. Розроблення вихрострумових методів ідентифікації матеріалу металевих об'єктів за результатами аналізу інформаційних сигналів у часовій і частотній областях.

3. Обґрунтування та відбір сукупності інформативних ознак сигналів вихрострумowego контролю, отриманих в результаті взаємодії зондувального електромагнітного поля з прихованим металевим об'єктом в динамічному режимі.

4. Удосконалення вихрострумowego засобу, розроблення алгоритму його роботи та створення діючого макету засобу для перевірки ефективності запропонованих вихрострумових методів ідентифікації матеріалу металевих об'єктів.

5. Створення бази образів металів за обраними сукупностями інформативних ознак сигналів.

6. Проведення експериментальних досліджень розроблених методів і засобу з ідентифікації матеріалу металевих об'єктів на обраній сукупності тестових зразків.

7. Впровадження результатів досліджень в практику вихрострумowego контролю для розв'язання завдання ідентифікації металів.

Об'єктом дослідження є процес ідентифікації матеріалу металевих виробів за сигналами неруйнівного контролю.

Предметом дослідження є вихрострумний метод і засіб ідентифікації матеріалу металевих виробів.

Методи дослідження.

Поставлені в роботі задачі вирішувались на основі методів неруйнівного контролю, експериментальних досліджень, методів математичної статистики, спектрального аналізу та числового моделювання з використанням диференційного числення.

Наукова новизна отриманих результатів. Основні результати роботи, які визначають її наукову новизну та виносяться на захист:

1. Вперше запропоновано вихрострумний метод ідентифікації типу металу у виробі під час сканування ділянки простору з цими виробами вихрострумовим перетворювачем, який полягає в аналізі інформаційних сигналів у частотній області, що на відміну від відомих методів, дає змогу ідентифікувати метали в межах підгруп чорних та кольорових металів.

2. Вперше запропоновано вихрострумний метод ідентифікації типу металу у виробі під час сканування ділянки простору з цими виробами вихрострумовим перетворювачем, який полягає в аналізі інформаційних сигналів у часовій області, який, на відміну від відомих, ґрунтується на заміні сигналів їх графічно-цифровими образами, що в ряді завдань забезпечує ідентифікацію металів з більшою достовірністю.

3. Вперше запропоновано нові для задачі виявлення та ідентифікації матеріалу металевих виробів сукупності інформативних ознак сигналів вихрострумного контролю, отриманих в результаті взаємодії зондувального електромагнітного поля з прихованим металевим об'єктом в динамічному режимі - екстремуми та переходи сигналу через нульовий рівень в часовій області, та площа під обвідною спектру та його смуга в спектральній області представлення сигналу, які є достатніми для достовірної ідентифікації металу

виробу та дає змогу проводити ідентифікацію металів в межах підгруп чорних та кольорових металів в реальному часі.

Практичне значення одержаних результатів

1. Розроблено макет вихрострумової системи контролю та алгоритм її роботи, що дало змогу перевірити і підтвердити ефективність запропонованих методів ідентифікації металів за аналізом інформаційних сигналів у часовій і частотній областях.

2. Розроблено структуру вихрострумової адаптивної системи контролю, яка дає змогу дистанційно проводити ідентифікацію металу з якого виготовлений об'єкт, в тому числі прихований в діелектричному середовищі, в межах підгруп чорних та кольорових металів.

3. Експериментально досліджено сигнали відгуків від ряду кольорових та чорних металів, отриманих в результаті взаємодії зондувального електромагнітного поля з металевими об'єктами, та створено бази їх образів у вигляді спектральних характеристик сигналів та їх графічно-цифрових образів, які можуть слугувати основою для створення нових систем ідентифікації металів та сплавів.

4. Закладено передумови для створення бази образів за обраними інформаційними ознаками не лише металів та сплавів, але й об'єктів, що виготовлені з декількох металів та мають складну геометричну форму, до прикладу, детонатори вибухових пристроїв.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в дослідницьку діяльність ЦНДІ ОВТ ЗСУ ДР 0117U00062д, а також в навчальний процес кафедри радіотехнічних пристроїв та систем радіотехнічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні положення і результати моделювання в дисертаційній роботі автором отримані самостійно. Особистий вклад автора полягає у тому, що автором написано 12 статей за темою дисертації.

У роботах, опублікованих у співавторстві, особисто автором виконано: [1] – огляд існуючих методів виявлення металів; [2, 3] – проведено огляд існуючих георадарів та вказано перспективні напрями їх подальшого розвитку – радіолокаційно–вихрострумового метода; [4] – розроблено інформативні ознаки у сигналі радіотехнічної системи ближньої локації для дихотомічного розрізнення металів (за ознакою магнітний / немагнітний); [5] – розроблено інформативні ознаки у сигналі радіотехнічної системи ближньої локації для розрізнення металів в спектральній області в середині підгруп немагнітних та магнітних металів; [6] – розроблено інформативні ознаки у сигналі радіотехнічної системи ближньої локації для розрізнення металів в часовій області в середині підгруп немагнітних та магнітних металів та запропоновано метод графічно-цифрових образів; [7] – розроблено алгоритм пошуку інформативних максимумів в сигналі для його нормування за тривалістю для зручності подальшої обробки; [8] – розроблено структурну схему РСБЛ на якій використані спектральний та метод графічно-цифрових образів; [9] – запропоновано створити базу даних образів металевих виробів, яку можна використовувати при розмінуванні територій; [10] – розглянуто фізичні ефекти та запропоновано пояснення причини виникнення сигналу контролю, який обробляється системою для ідентифікації металів; [11] – запропоновано математичну модель, що дозволяє отримати теоретичні сигнали, подібні до експериментально виміряних. Показано перспективи та подальші шляхи розвитку даного моделювання сигналів контролю відгуків від різних металів; [12] – здійснено порівняння розроблених методів обробки сигналу відгуку та показано можливості розроблених методів для ідентифікації металів при зашумленні сигналів відгуків; [16] – запропонована модифікована радіотехнічна система; [17] – здійснено огляд існуючих типів металодетекторів та вказано перспективні напрямки – створення радіотехнічної системи ближньої локації для виявлення металів; [20] – запропонована структурна схема радіолокаційно-вихрострумового радара;

[22] – розроблено метод графічно-цифрових образів, що полягає у заміні сигналу в часовій області відповідними його графами амплітуд на основі радіотехнічної системи ближньої локації; [25] – запропоновано використовувати метод лінійного передбачення для дихотомічного розрізнення металів по сигналам радіотехнічної системи ближньої локації; [29] – запропоновано в спектральній області нові інформативні ознаки: площу під обвідною та форму обвідної; [30] – запропоновано новий інформативний параметр $K\%$ для розрізнення металів в часовій області по сигналам радіотехнічної системи ближньої локації; [31] – запропоновано накопичення бази образів різних металевих виробів для їх аналізу радіотехнічною системою ближньої локації.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації і основні положення, отримані в роботі апробовані на 12 міжнародних наукових конференціях та 6 науково-технічних конференціях: науково-технічна конференція "Фізика, електроніка, електротехніка" (Сумський державний університет, 22-27 квітня 2013 р., 21-26 квітня 2014 р., 20-25 квітня 2015 р., 17-21 квітня 2017 р.); IV науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених "Радіоелектроніка в ХХІ столітті" (НТУУ "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", 22-23 квітня 2010 р.); V науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених "Радіоелектроніка в ХХІ столітті" (НТУУ "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", 30-31 березня 2011 р.); міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали та системи» (НТУУ "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", 11-15 березня 2013 р., 10-16 березня 2014 р., 16-22 березня 2015 р., 14-20 березня 2016 р., 20-26 березня 2017 р. (дві доповіді), 19-25 березня 2018 р. (дві доповіді)); V міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій" (Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 17-18 листопада 2016 р.); IV

міжнародна науково-практична конференція: "Проблеми координації військово-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння і військової техніки" (Київ, ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 12-13 жовтня 2016 р.); V міжнародна науково-практична конференція: "Проблеми координації військово-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння і військової техніки" (Київ, ЦНДІ ОВТ ЗСУ 11-12 жовтня 2017 р.); міжнародна науково-технічна конференція "Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ" (Львів, Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, 11-12 травня 2017 р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опублікована 31 наукова праця, в тому числі 11 статей у фахових журналах та 1 стаття в іноземному журналі - державі ЄС (6 із них включені до міжнародних науково-метричних баз 3 статті в Scopus, 2 статті у Web of Science та одна стаття у Index Copernicus), отримано 3 авторських свідоцтва, 16 тез доповідей.

Структура роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації становить 185 сторінок, з них 127 сторінок основного тексту, 57 рисунків, 27 таблиць і 2 додатки на 10 сторінках, список використаних джерел з 98 найменувань на 13 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ МЕТАЛІВ

1.1. Радіотехнічні системи як детектори та аналізатори складу металів, їх актуальність

Для ідентифікації металу найчастіше використовують хімічний, рентгено-флуоресцентний та оптико-емісійний методи [1]. Прилади, що реалізують вказані методи, працюють в рентгенівському або оптичному діапазоні та вимагають наявності зразка металу, поверхня якого обов'язково повинна бути очищена. Вони не дозволяють проводити дистанційний аналіз складу об'єкту та обов'язково вимагають лабораторних досліджень.

Найбільше розповсюджений хімічний метод. Він побудований на хімічному розкладі досліджуваного матеріалу на атоми та молекули і подальшому їх спектральному дослідженню. Це найбільш точний метод аналізу. На кінцевий результат досліджень впливають точність виміру, маса проби, точність складання реактивів, похибки вимірювальних пристроїв (фотоелектрокалориметрів та спектрофотометрів). До його недоліків також можна віднести тривалість проведення досліджень та достатньо високу вартість аналізу.

Зараз хімічний метод починає замінюватися рентгено-флуоресцентним, атомно-абсорбційним, атомно-емісійним та іншими методами [2]. Найбільш розповсюдженим з них є рентгено-флуоресцентний аналіз. Для проведення аналізу при цьому методі необхідно досліджуваний матеріал помістити в спеціальний прилад та за допомогою встановленої на нього програми, здійснити елементний аналіз зразка, результати якого Однак, такий метод потребує наявності безпосереднього контакту із зразком металу. Крім того, перш ніж помістити зразок в спектрограф, його необхідно знайти та

розмістити в лабораторному пристрої. порівняти з базою даних відомих матеріалів.

Однак, як показали дослідження проведені в дисертаційній роботі, аналіз складу об'єктів можна виконати дистанційно (безконтактно), використовуючи властивості електромагнітного поля.

Технічною основою досліджень, що проведені в дисертаційній роботі, обрані радіотехнічні системи для ідентифікації металів. Задачу аналізу прихованих металів можна розбити на два етапи: виявлення об'єкту та аналіз його складу.

Задача виявлення [3, 4] здійснюється вихрострумовими пристроями (ВСП) [5, 6, 2], призначеними для виявлення та ідентифікації предметів, які за своїми електричними чи магнітними властивостями відрізняються від середовища, в якому вони знаходяться.

Задача аналізу прихованих металів сучасними ВСП в повному обсязі не вирішується. Для аналізу необхідно знайти метал та використати один із відомих методів аналізу складу цього металу [7].

Максимальну інформацію про тип металу, в тому числі і його склад, можна отримати, використовуючи запропоновані цифрові методи отримання та обробки отриманого в результаті контролю вихрострумового сигналу, які і розглянуті у даній дисертації.

Перш ніж перейти до аналізу запропонованих методів, розглянемо більш детально найбільш розповсюджені відомі методи аналізу складу металів.

1.2. Огляд принципів побудови детекторів та аналізаторів складу металів

Для аналізу складу металу, як вказано в підрозділі 1.1, використовують хімічний метод, рентгено-флуоресцентний та опто-емісійний.

1.2.1. Огляд контактних методів аналізу складу металів

Оптико-емісійні методи аналізу використовуються для дослідження деталей, заготовок тощо [7]. Є декілька різновидів методу, але всі вони побудовані на розігріванні металу електричним полем, що виникає при створенні іскри чи дуги, потужним лазером чи газовим полум'ям. Метал, що досліджується, частково випаровується, проходить через повітряне чи аргонне середовище і реєструється спектрометром. Склад металу визначають за спектром випромінювання кожної складової матеріалу, що досліджується.

Структурна схема оптико-емісійного аналізатора показана в [7] містить:

1 – конденсатор, 2 – джерело світла, 3 – монохроматор, 4 – суміжний фільтр, 5 – модулятор, 6 – фотоелектронний помножувач (ФЕП), 7 – анод, 8 – підсилювач, 9 – фільтр, 10 – логарифматор, 11 – блок живлення ФЕП, 12 – електронна обчислювальна машина (ЕОМ), 13 – цифровий вихід, 14 – блок керування, 15 – цифро-аналоговий перетворювач, 16 – телетайп, 17 – самописець.

Оптико-емісійні прилади можуть визначати незначні домішки в металах, наприклад, кількість фосфору, вуглецю чи сірки в чорних металах. Висока точність визначення домішок дозволяє використовувати їх для сертифікаційного аналізу, однак відповідні прилади поставляються уже з записаними в них аналітичними програмами, що значно ускладнює аналіз сплаву з невідомим або орієнтовно визначеним складом, адже прилад розпізнає тільки відомий йому сплав.

Крім того, обов'язковим є проведення підготовки проби – зразок заточують на шліфувальному колі або обробляють напилком для зняття верхнього забрудненого шару, що призводить до пошкодження зразка.

Рентгено-флуоресцентний аналіз складу металу дозволяє проводити контроль складу без значного пошкодження об'єкту дослідження [8]. Цей тип

приладів може проводити аналіз до декількох десятків елементів в сплавах. Розмір проби може бути достатньо малим, наприклад, стружка. До недоліків рентгенофлуоресцентних приладів можна віднести неможливість реєструвати елементи з порядковим номером менше 11 за таблицею Менделєєва [8]. Це не дозволяє аналізувати матеріали, що містять вуглець (чавун та сталь). Крім того, вони менш точні, а поверхня об'єкту, що аналізується, обов'язково повинна бути очищена від фарби та іржі.

Світлочутливі елементи аналізатора визначають до 45 хімічних елементів [8].

Рентгено-флуоресцентні аналізатори складаються з [8]:

- рентгенівської трубки, яка флуоресціює;
- камери спектрофотометра із гоніометром;
- сцинтиляційного лічильника;
- модуля керування.

Такі аналізатори працюють швидко, а контроль проводиться без руйнування об'єкту дослідження.

Однак такий метод також потребує наявності зразка металу і не дозволяє визначити його склад дистанційно (безконтактно), без лабораторних досліджень.

Переваги рентгено-флуоресцентних методів:

- 1) Вони менш точні, але для роботи з бруктом і сортувальних завдань їх точності вистачає;
- 2) Метод аналізу можна назвати універсальним – прилад виявить всі елементи, в тому числі, і важкі, які знаходяться в досліджуємому об'єкті в діапазоні його чутливості.

Недоліки рентгено-флуоресцентних методів:

- 1) Поверхню аналізованого об'єкта також треба обробляти, бо з нього необхідно видалити фарбу та іржу, що веде до пошкодження зразка.

Щоб подолати вище зазначені обмеження оптико-емісійних та рентгено-флуоресцентних металоаналізаторів, бажано використовувати радіолокаційні методи для електромагнітного аналізу металів.

Радіолокаційний (електромагнітний імпульсний) метод виявлення металевих об'єктів вперше були використані для знаходження вибухонебезпечних предметів, мін за допомогою вихрострумових перетворювачів, які аналізують сигнал взаємодії з об'єктом [9]. Далі проаналізовано можливості радіолокаційних (імпульсних) методів.

1.2.2. Огляд металодетекторів (простих аналізаторів металів) побудованих на взаємодії електромагнітного поля та металу

В основі побудови сучасних металодетекторів лежить аналіз взаємодії електромагнітного поля перетворювача з електромагнітним полем наведених вихрових струмів, що збуджуються перетворювачем в об'єкті контролю [3]. Зараз існує велика кількість металодетекторів, в основу яких покладено вихрострумовий метод [10, 11].

Зміна електромагнітних властивостей середовища або об'єкта контролю, що відбувається під дією опромінення електромагнітним полем, призводить до зміни параметрів вихрових струмів і створеного ними вторинного магнітного потоку. Як наслідок, змінюється сумарний магнітний потік системи «вихрострумовий перетворювач – об'єкт контролю», що, в свою чергу, призводить до зміни електричних параметрів (опір, струм, е.р.с.) вимірювальної обмотки перетворювача, які відстежуються в приладах, що включені у вимірювальне коло. Індукційний перетворювач в загальному випадку є котушкою, що створює однорідне змінне магнітне поле. В процесі пошуку прихованого об'єкту індукційний перетворювач переміщається над поверхнею об'єкта. При перетині поля та металевго об'єкту магнітний потік спотворюється, і в чутливому елементі приладу ("антені") виникає

електричний сигнал, що несе інформацію про наявність об'єкту в даному місці [10]. Як правило, чутливий елемент ("антенна" система) складається з передавальної (за звичай одна котушка) і приймальної котушок (їх може бути більше однієї, наприклад дві, ввімкнені диференціально). Всі відомі типи приладів можна розбити на класи [3, 5]:

1. Металодетектори на одному генераторі (FM, Frequency Meter – частотомір)
2. Металодетектори на "битті" електромагнітних хвиль (BFO, Beat Frequency Oscillation – англ. – генератор на биттях).
3. Металодетектори TR/IB (Transmitter Receiver/Induction Balance) або передача-прийом з індуктивним балансом.

1.2.2.1 Металодетектори з одним автогенератором

Відомо, що частота сигналу, який генерується в паралельному коливальному контурі, залежить від індуктивності котушки і ємності конденсатора. При зміні хоча б одного з цих параметрів зміниться резонансна частота контуру, що призводить до відповідної зміни частоти генерації. Найлегше змінити індуктивність котушки. Для цього досить, наприклад, помістити поблизу неї предмет з металу. Дане фізичне явище і покладено в основу конструкції детекторів металевих предметів, які працюють за принципом зміни частоти .

Сучасні технічні засоби дозволяють реалізувати компактний прилад, що має високу точність і оцінювати в реальному масштабі часу невеликі девіації частоти вимірювального генератора. Такі прилади можна назвати металошукачами, що працюють за принципом частотоміра. Прилади цього класу, крім маси сервісних можливостей мікропроцесорної реалізації, мають можливість оцінки знака збільшення частоти. В них феромагнітний досліджуваний об'єкт зазвичай призводить до зниження частоти

«вимірювального» генератора, а об'єкт з металу-неферромагнетика – до підвищення частоти [12].

Таким чином, металодетектори з використанням одного автогенератора здійснюють селекцію об'єктів за типом металу. Крім того, даний клас приладів практично не схильний до ефекту паразитної синхронізації, тому що частота вимірювального генератора і частоти інших допоміжних сигналів (наприклад, тактова частота мікропроцесора) дуже сильно відрізняються одна від одної. Це дозволяє підвищити їх чутливість.

Такий прилад компактний, ним зручно користуватися, коли що-небудь вже виявлено більш чутливим приладом [3, 10, 13].

1.2.2.2 Металодетектори типу BFO (Beat Frequency Oscillation – генератор биттів)

Відомо, що при перемноженні двох періодичних сигналів з близькими частотами f_1 і f_2 , приблизно, однаковими амплітудами виникають пульсації амплітуди сумарного сигналу. Частота пульсації дорівнює різниці частот двох сигналів, що складаються. Пропустивши такий сигнал через випрямляч (детектор), можна виділити сигнал різницевої частоти (биття).

Спрощена структурна схема металодетектора, що працює на биттях, показана в [14]. Така схемотехніка довгий час була традиційною, проте в даний час вона рідко використовується в радіотехніці, в металошукачах. На зміну амплітудним детекторам прийшли синхронні детектори, але термін "на биттях" залишився досі.

Сигнали зразкового генератора $G1$ f_1 і вимірювального генератора $G2$ f_2 подаються на функціональний змішувач $U1$, що використовується як фазовий детектор системи ФАПЧ. Змішувач працює на другій гармоніці частоти вимірювального генератора, що значно послаблює паразитний зв'язок останнього із зразковим.

Сигнал з підсилювача постійного струму А1 після проходження фільтра нижніх частот Z1 поступає на вхід управління частотою вимірювального генератора. У режимі захоплення, рівність $f_1 = 2f_2$ виконується точно і напруга на виході А1 постійна [15].

Наближення металевого предмета до котушки коливального контура вимірювального генератора (G2) змінює частоту його коливань f_2 . Проте, ФАПЧ підтримує синхронність генераторів, компенсуючи відхід частоти вимірювального генератора зміною напруги на вході управління частотою генератора.

Змінну складову напруги, що виникає на виході підсилювача А1 при скануванні котушкою-датчиком над металевим предметом, виділяє фільтр верхніх частот Z2. Через підсилювач А2 вона поступає на вхід генератора звукової частоти G3, сполученого із звуковим сигналізатором НА1 [14].

Принцип дії металодетектора на биттях полягає в реєстрації різниці частот від двох генераторів, один з яких є стабільним по частоті, а інший містить датчик – котушку індуктивності в своїй частотозадавальній частині. Прилад настраюється таким чином, щоб під час відсутності металу поблизу датчика частоти двох генераторів збігалися, або були дуже близькі за значенням. Наявність металу поблизу датчика призводить до зміни його параметрів і, як наслідок, до зміни частоти відповідного генератора. Ця зміна, як правило, дуже мала, однак зміна різниці частот двох генераторів вже істотна і може бути легко зареєстрованою.

Різниця частот може реєструватися різними шляхами, починаючи від найпростішого, коли сигнал різницевої частоти прослуховується на головні телефони або через гучномовець, і закінчуючи цифровими способами вимірювання частоти.

Чутливість металошукача на биттях залежить, від значення різницевої частоти стабільного генератора і генератора з котушкою-датчиком в частотозадавальному колі. Реєстрація невеликих відхилень частоти

представляє певну складність. Так, на слух можна впевнено зареєструвати відхід частоти тонального сигналу не менше 10 Гц, а візуально, за меретінням світлодіода, можна зареєструвати відхід частоти не менше 1 Гц. Іншими способами можна домогтися реєстрації і меншої різниці частот, однак ця реєстрація потребує значного часу, що неприйнятно для приладів, які завжди працюють в реальному масштабі часу [14].

Спосіб виділення невеликої за величиною різниці частот двох генераторів породжує суттєву технічну проблему – паразитну взаємну синхронізацію генераторів (захоплення фази). Ця синхронізація проявляється в тому, що при спробі наблизити якимось шляхом різницеву частоту двох генераторів до нуля, по досягненню різниць частотою деякого порогу відбувається стрибкоподібний перехід до стану генераторів, при якому їх частоти збігаються. Генератори стають синхронізованими [14]. Фізично явище захоплення фази пояснюється нелінійностями, неминуче присутніми в будь-якому генераторі, і паразитними проникненнями сигналу одного генератора в інший (по колах живлення, через паразитні ємності і т.д.) [14]. Як показує практика, якщо не вдаватися до спеціальних методів розв'язки генераторів [14], типу оптоелектронної розв'язки, то реально отримати для різницевої частоти поріг настання паразитної синхронізації порядку 10^{-4} відносно частоти генераторів [14]. Звідси можна отримати оцінку для частоти, на якій повинен працювати металошукач на биттях, – це 10 ... 100 кГц і вище.

Селективність по виявленню металів на таких частотах, вельми далеких від оптимальної, проявляється дуже слабо. Крім того, за зсувом частоти генератора визначити фазу відбитого сигналу практично неможливо. Тому селективність за типом металу у металошукача на биттях слабка.

1.2.2.3. Металодетектори TR/IB (Transmitter Receiver / Induction Balance)

В основу роботи відповідних пристроїв покладено принцип «прийому-передачі» (радіолокаційний метод). В [16] показана структурна схема металодетектора TR/IB.

У таких пристроях, які ще називають балансними металошукачами, система котушок [17] збалансована до нульової взаємної індукції [18 - 20].

Головна особливість пристроїв TR/IB полягає в тому, що на приймальну котушку надходить не відбитий сигнал передавача, а сигнал, джерелом якого є вихрові струми, отримані на поверхні металевго предмета [21 – 23].

Передавальний (зондуючий) сигнал, що формується опорним генератором, надходить на підсилювач і далі – на передавальну котушку. При появі металевго предмета в зоні випромінювання передавальної котушки на його поверхні під впливом сигналу VLF (Very Low Frequency) (працюють в діапазоні частот від 3 до 30 кГц) ініціюються вихрові (поверхневі) струми. Ці струми є джерелом вторинного сигналу [24 - 26], який реєструється приймальною котушкою. З виходу приймача сигнал подається на аналізатор, де відбувається оцінка його параметрів [27 – 29]. На її основі формується відповідний сигнал блоку індикації.

Слід зазначити, що головними перевагами таких металодетекторів є висока чутливість, можливість компенсації відбиття сигналу не тільки від ґрунту, але і від різного сміття [30 – 32]. І, звичайно ж, такі пристрої дозволяють визначати тип металу (магнітний чи не магнітний).

Головним же недоліком балансних металошукачів слід вважати труднощі, що виникають при виготовленні і балансуванні системи "антенних" котушок [17, 33].

Опис характеристик сучасних ВСП, зазначення позитивних та негативних характеристик кожного з них [18, 19, 20], наведення існуючого

модельного ряду та аналіз перспективних напрямів і методів для створення нових ВСП наведено у табл.1.1.

Таблиця 1.1 – Існуючі промислові зразки ВСП [10]

| Фірма виробник | Назва моделі | Дальність виявлення на повітрі (монети діам. 25мм / каски), см | Компенсація впливу мінералізації ґрунта: ручна / авто/ фіксована |
|----------------|--------------|--|--|
| АКА | Юниор | 40/180 | +/-/- |
| Minelab | Musketeer | 30/80 | +/+/- |
| Garrett | ACE 250 | 20/60 | -/-/+ |
| Tesoro | Compadre | 17/100 | -/+/- |
| Fisher | 1270 | 25/75 | -/+/+ |

1.2.3. Фактори, що впливають на вихідний сигнал металодетекторів

Огляд принципів побудови приладів [3, 34, 35] показав, що оптимальними для розрізнення металів є металодетектори з сигналами VLF [36, 37]. Передавальна "антена" [38, 39] такого металодетектора випромінює первинне електромагнітне поле, яке приймається приймальною "антеною", налаштованою так, щоб при відсутності металевих предметів між приймальною та передавальною "антенами" на вході приймача був мінімальний рівень сигналу.

Якщо в поле дії "антен" попадає металевий предмет, то по закону Фарадея [40] змінне електромагнітне поле на поверхні предмета індукуює електричний струм, яким створюється вторинне електромагнітне поле. Під дією вторинного електромагнітного поля первинне змінюється і на виході приймальної "антени" виникає сигнал. Електричні та магнітні властивості

невідомого металевого предмета впливають на форму прийнятого сигналу [10].

В сучасних металодетекторах ідентифікація типу металу [41, 42] здійснюється шляхом виділення інформативного сигналу на фоні заважаючого фактору [43]. Для виділення інформативного сигналу використовують амплітудний, фазовий та частотний методи обробки сигналу.

Амплітудний метод використовується тоді, коли заважаючий фактор впливає на амплітуду прийнятого сигналу. Для цього до складу металодетектора вводять амплітудний детектор, який слідує за амплітудою вхідного сигналу. При досягненні порогового рівня, що відповідає вибраному матеріалу досліджуваного об'єкту, спрацьовує індикаторний пристрій, який сигналізує про наявність об'єкту. В цьому випадку зміна фази чи частоти сигналу не буде впливати на показання приладу. Більшість сучасних металошукачів якраз і використовує ідентифікацію металу за пороговим рівнем сигналу [3, 44].

Фазовий та частотний методи застосовуються у випадку значного впливу заважаючого фактору на амплітуду сигналу. Для реалізації даних методів замість амплітудного детектора використовують фазовий чи частотний [22]. Останні два методи використовуються в приладах неруйнівного контролю [22].

Крім того частотний метод використовується в найпростіших металодетекторах з одним генератором.

Можлива і одночасна реєстрація фази і амплітуди сигналу $U_{ВД}$, зміна яких призводить до зміни положення вектора вхідного сигналу на комплексній площині, що дозволяє побудувати годограф вхідної напруги та, відповідно, контролювати і фазу, і частоту. Однак, при великих значеннях магнітної проникності $\mu > 30$ годографи $U_{ВД}(\sigma)$ та $U_{ВД}(\mu)$ зливаються і окремо контролювати магнітну проникність та провідність досліджуваних матеріалів

стає неможливо. Це не дозволяє розрізнити магнітний та немагнітний метали, які знаходяться поряд.

Існуючі металодетектори, побудовані на вихрострумовому методі розрізнення металів, здійснюють лише дихотомічний аналіз металів з поділом на групи магнітних та немагнітних металів та не дозволяють визначати тип металу, якщо два зразки із різних металів знаходяться поруч.

1.3. Останні наукові досягнення та невирішені питання в області ідентифікації металів вихрострумовими пристроями

Наукові роботи у напрямку поліпшення технічних характеристик металодетекторів проводяться достатньо інтенсивно. Так з 2005 – по 2019 рік захищено ряд дисертаційних робіт, наприклад, дисертації Килимника О. М. [45] та SVATOŠ Jakub [46], які присвячені розробці та поліпшенню технічних характеристик вихрострумових металошукачів.

Найближчою до вирішення задач, поставлених у даній дисертації, є робота [46]. В ній розглядається обробка сигналів отриманих внаслідок вихрострумової взаємодії з металом з метою розрізнення металевих предметів за вимірюванням фазового зсуву прийнятого сигналу з опорним сигналом. В роботі пропонуються методи обробки сигналів в часовій області для виявлення інформаційних ознак про склад металу, які не є традиційними при виявленні металевих об'єктів.

Автор [46] провів ряд експериментів для визначення складу металів на основі вихрострумового методу з використанням кореляційних методів, на основі чого було вибрано тільки стандартні інтегральні параметри сигналу, такі як діюче та пікові значення сигналу і пік-фактор (співвідношення величини амплітуди сигналу до його діючого значення).

В якості "антенної" системи автором [46] використовувалися магнітні рамочні "антени" (приймальна та передавальна), в яких на передавальну "антену" подавався сигнал типу $\sin(x)/x$ [46].

Розрізнення металевих предметів здійснюється за зміною фазового зсуву прийнятого сигналу, для цього використовувалися метод Баєса, метод к-ближніх сусідів (KNN) та метод опорного автоматичного вектору (SVM) [46].

Для пояснення виникнення сигналу на виході приймальної антени, використовується модель, розроблена у дисертації Claudio Bruschini[47]. Його модель побудована на аналізі електричного кола, яке складається з індуктивно зв'язаних між собою елементів. Розглянуто вплив параметрів металу (індуктивність, провідність) на сигнал у приймальній антені. Основні складові моделі це: передавальна магнітна рамочна антена (катушка), приймальна магнітна рамочна антена та металевий зразок, який рухається поруч із зоною дії антенн. Зразок металу характеризується такими параметрами як індуктивність та опір.

Від передавальної антени на приймальну наводиться електромагнітне поле такої ж частоти, але меншої амплітуди. При попаданні у поле антенного блока металевого зразка, на приймальну антенну починає наводитись вторинне електромагнітне поле, що виникає під дією струмів Фуко на поверхні самого зразка.

Рух зразка у полі антенного блоку призводить до зміни взаємоіндукції між передавальною антеною та об'єктом, приймальною антеною та об'єктом, антенами безпосередньо.

Для оцінювання характеристик зразка, Claudio Bruschini порівнює між собою напругу, яка наведена в приймальній антені безпосередньо через зв'язок приймальної та передавальної антен, та напругу, яка наведена в приймальній антені завдяки впливу металевого об'єкту.

Отриманий "відклик" $G(\omega)$ сигналу у приймальній антені, що наводиться від металу, тобто різниця між первинним та вторинним полем у приймальній антені є комплексною функцією.

Проаналізувавши функцію $G(\omega)$, Claudio Bruschini наводить вираз (с.56, дисертація Claudio Bruschini), який враховує лише α , тобто електромагнітні властивості металу (L, R) .

Якщо $\alpha \rightarrow \infty$, $X(\alpha) \rightarrow 1$, $Y(\alpha) \rightarrow 0$, $F(\alpha) \rightarrow 1$, то це зразок із металу, який має велику електропровідність.

Якщо $\alpha \rightarrow 0$, $F(\alpha) \rightarrow i\alpha$, то це зразок із металу, який має малу електропровідність.

Фаза змінюється від 90 градусів для слабопровідних металів і до 0 градусів для високопровідних металів.

Розробивши свою модель, Claudio Bruschini наводить наступні висновки:

- теоретично вдалося довести, що зміна фази вимірювального сигналу свідчить про дихотомічне розрізнення металів (чорний / кольоровий);

- моделі є абстрактними і не можуть застосовуватись для реальних умов.

Отримані в [46] та [47] результати розрізнення металів на основі вимірювання зміни фази вимірювального сигналу є недостатніми при аналізі їх типу, тому що вони дозволяють проводити лише дихотомічний аналіз типу металів.

В результаті аналізу такої ситуації, можна константувати, що:

1. Аналіз складу металів такими методиками як: оптико-емісійна, хімічна та рентгено-флуоресцентна, показав, що всі вони потребують контакту із зразком металу і не дозволяють визначити його склад безконтактно в польових умовах.

2. Дані методи потребують попередньої підготовки зразка металу до ідентифікації. Поверхня об'єкту, що аналізується, обов'язково повинна бути очищена від фарби та іржі (тобто, пошкоджена).

3. Ці недоліки можуть бути усунені використанням електромагнітних аналізаторів металів, побудованих на вихрострумовому принципі зі спеціально розробленими методами отримання та обробки сигналу, що дозволить проводити безконтактний аналіз металевих об'єктів.

1.4. Мета і завдання даних наукових досліджень

Метою роботи є забезпечення ідентифікації металів всередині підгруп магнітних / немагнітних на основі удосконалення вихрострумового методу контролю.

Відповідно до мети, *основними завданнями* дослідження є:

1. Аналіз сучасного стану методів ідентифікації металу у виробках з різними невідомим мас-габаритними характеристиками та обґрунтування вихрострумового методу для реалізації цього завдання.

2. Розроблення вихрострумових методів ідентифікації матеріалу металевих об'єктів за результатами аналізу інформаційних сигналів у часовій і частотній областях.

3. Обґрунтування та відбір сукупності інформативних ознак сигналів вихрострумового контролю, отриманих в результаті взаємодії зондувального електромагнітного поля з прихованим металевим об'єктом в динамічному режимі.

4. Удосконалення вихрострумового засобу, розроблення алгоритму його роботи та створення діючого макету засобу для перевірки ефективності запропонованих вихрострумових методів ідентифікації матеріалу металевих об'єктів.

5. Створення бази образів металів за обраними сукупностями інформативних ознак сигналів.

6. Проведення експериментальних досліджень розроблених методів і засобу з ідентифікації матеріалу металевих об'єктів на обраній сукупності тестових зразків.

7. Впровадження результатів досліджень в практику вихрострумового контролю для розв'язання завдання ідентифікації металів.

РОЗДІЛ 2

УДОСКОНАЛЕННЯ ВИХРОСТРУМОВОГО МЕТОДУ ТА ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МЕТАЛІВ

2.1. Динамічний вихрострумний метод контролю типу металів.

Вихрострумний метод контролю передбачає безконтактну взаємодію антени системи та металевого об'єкта. В роботі розробленої системи (засобу контролю) важливим моментом є те, що отримання сигналу відгуку від металів потребує руху зразка над антенним блоком.

На рис. 2.1 та рис. 2.2 показані вихідні сигнали на виході фазового детектора. Сигнали знімалися для одних і тих же зразків, але при різних швидкостях пронесення металу над котушками. Сигнал на вході фазового детектора системи визначається виразом:

$$U_e = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} B \quad (2.1) \quad \Phi = \oint_S \mathbf{B} \cdot \partial \mathbf{S} \quad (2.2) \quad \mathbf{B} = \mu_0 (\mu_r \mathbf{H} + \mathbf{M}_z) \quad \text{Тл} \quad (2.3)$$

де M_z – залишкова намагніченість, H – напруженість магнітного поля.

Напруга U_e (1.1) залежить від швидкості пронесення металу та від залишкової намагніченості M_z . Шляхом проведення експериментальних вимірювань встановлено, що амплітуда сигналу на виході фазового детектора при проходженні над котушкою залежить від швидкості пронесення металу над «антенною» системою, це визначається швидкістю зміни магнітного потоку (2.1).

Для підтвердження впливу струмів Фуко на сигнал проведено експеримент, в якому досліджувався сигнал на виході ФД для дюралюмінієвого зразка розмірами 20x25x3 мм та від набору пластин із дюралюмінієвої фольги товщиною 0,08 мм (пластини ізольовані одна від одної, загальна кількість пластин 30 шт), які мають ті ж самі геометричні розміри.

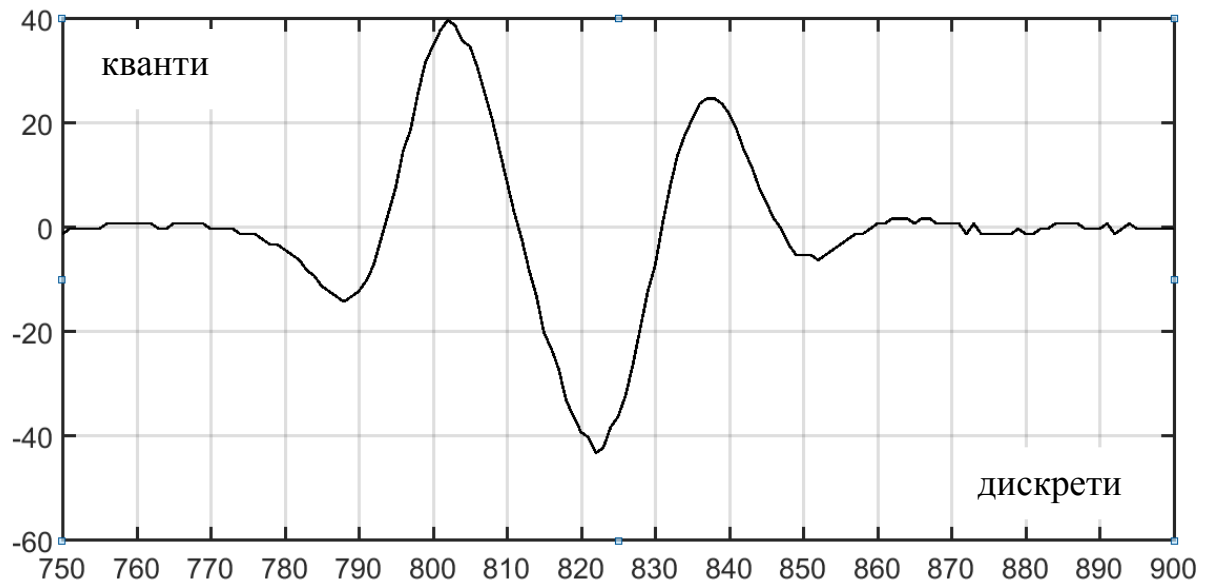


Рисунок 2.1 – Сигнал на виході ФД від мідного зразка. Період пронесення зразка над котушками 3000мс

На рис. 2.3 умовно показано зразки (монолітний та із пластин), які використовувались у експерименті на підтвердження впливу струмів Фуко на сигнал на виході ФД.

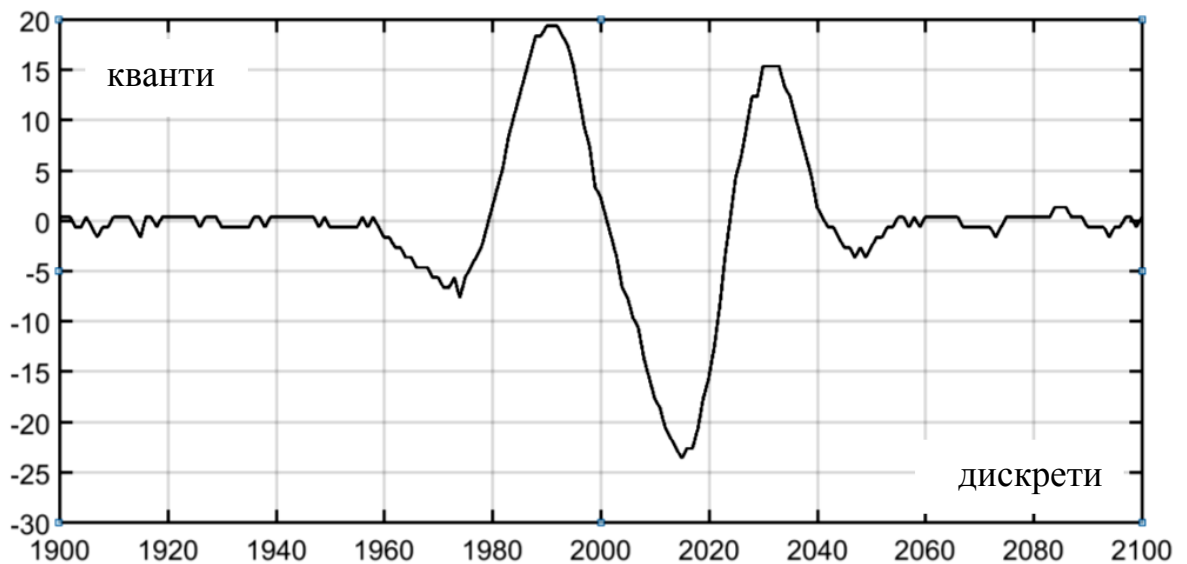


Рисунок 2.2 – Сигнал на виході ФД від мідного зразка. Період пронесення зразка над котушкою 4000мс

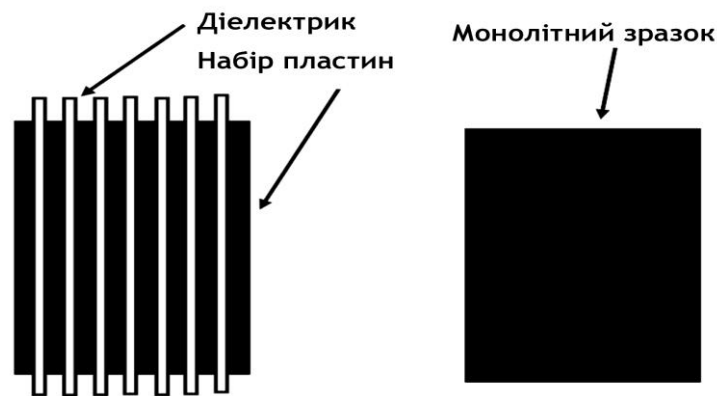


Рисунок 2.3 – Зразки, що використовувались для доказу дії струмів Фуко

На рис. 2.4 показано сигнали від монолітного зразка та набору пластин. Сигнал від монолітного зразка більший за амплітудою. Є різниця між максимумами для монолітного зразка, яка відсутня у сигналі отриманого від набору пластин.



Рисунок 2.4 –Сигнал від набору пластин (ліворуч) та монолітного зразка (праворуч)

При пронесенні металу над антеною на його поверхні виникає струм Фуко, його амплітуда зростає при доходженні від краю і до центра котушок.

Від центра котушок метал починає взаємодіяти із іншим краєм котушок уже із певним зарядом струмів Фуко, які спричиняють нерівномірність в амплітудах вихідного сигналу.

Зовнішній вигляд макету для динамічного знімання сигналів вихрострумового контролю показано на рис. 2.5, де 1 – блок "антен", 2 – метал, 3 – обертальна установка, H – відстань від "антенного" блоку до металу, L – довжина штанги "антенного" блоку.

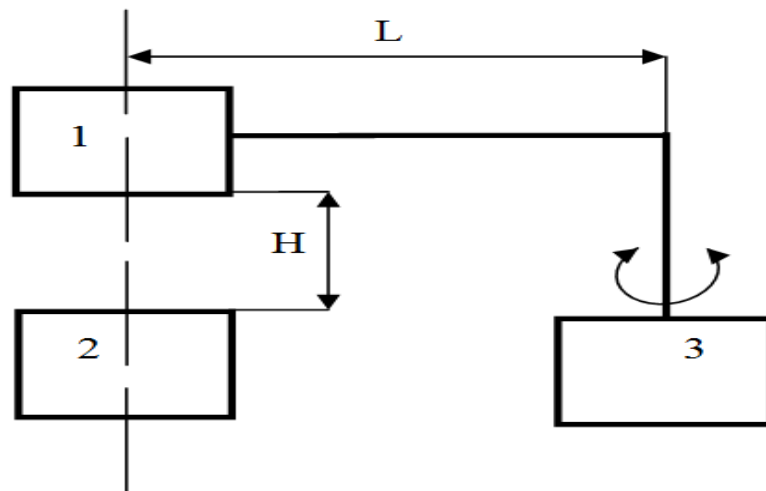


Рисунок 2.5 – Кінематична схема дослідної імітаційної установки

Із вище сказаного видно, що динамічне знімання вихрострумового сигналу контролю потрібно проводити при однакових умовах для усіх зразків. Тому для проведення достовірного аналізу складу металів пропонується розробити спеціалізовану цифрову систему, яка дозволить вносити зміни у програмний код на кожному етапі проведення досліджень та перевірити з її допомогою можливість використання нетрадиційних для вихрострумів методів обробки прийнятого сигналу:

- спектральний аналіз [9] (аналіз площ під кривими спектра);
- кепстральний аналіз (метод лінійного передбачення) [37, 48];
- аналіз в часовій області за допомогою запропонованого здобувачем метода графічно-цифрових образів [1, 42].

2.1.1. Котушки як "антенні" системи вихрострумових пристроїв

Чутливим елементом металодетекторів типу TR/IV є "антенні" системи [21], які складаються з однієї передавальної "антени" (випромінювальна котушка, обмотка) та приймальної "антени", що складається з одної або двох котушок (вимірювальні обмотки). "Антени" можна поділити на абсолютні та диференційні [22].

Детектори, які мають одну вимірювальну обмотку (ВО) називають абсолютними, тому що вимірюють абсолютне значення сигналу (струм, напругу або електрорушійну силу (е.р.с)), яке зчитується вимірювальною схемою приладу і відображається на індикаторі. За зміною сигналу судять про зміни параметрів об'єкта контролю.

Диференційні [12] мають, як мінімум, дві вимірювальні котушки (KB1 та KB2), що включені зустрічно. Вимірювальне коло зчитує різницю сигналів у вимірювальних обмотках, за зміною якої судять про зміни параметрів об'єкта контролю. Використання диференційних "антен" дозволяє компенсувати вплив зовнішніх магнітних полів, не пов'язаних з об'єктом контролю, завдяки тому, що величина паразитного сигналу, наведеного зовнішнім полем, в кожній вимірювальній обмотці однакова, і їх різниця дорівнює нулю.

Розглянемо роботу вихрострумового диференційного перетворювача, що в своєму складі має передавальну і дві вимірювальні котушки (рис. 2.6). Передавальна котушка підключена до джерела живлення і призначена для збудження вихрових струмів в об'єкті контролю. Вимірювальні котушки KB1 та KB2 включені послідовно, зустрічно, утворюючи вимірювальну обмотку з загальними виводами. Якщо перетворювач не встановлено над об'єктом контролю, магнітний потік Φ_1 , створений обмоткою передавальної котушки W1, наводить в вимірювальних котушках е.р.с. e_1 і e_2 . Оскільки, вимірювальні котушки включені зустрічно, то наведені в них е.р.с. діятимуть

в протифазі і сумарна е.р.с на виводах вимірювальної обмотки буде дорівнювати нулю.

Якщо перетворювач встановити над об'єктом контролю, то наведені вихрові струми створюють власний магнітний потік Φ_2 , спрямований зустрічно потоку перетворювача. Як наслідок, е.р.с. вимірювальних обмоток e_1 і e_2 буде зменшуватися. При цьому потік вихрових струмів буде чинити більший вплив на найближче розташовану до об'єкту контролю вимірювальну котушку KB2, викликаючи істотне зменшення її е.р.с. На виводах вимірювальної обмотки з'явиться сигнал неузгодженості $e = e_1 - e_2$.

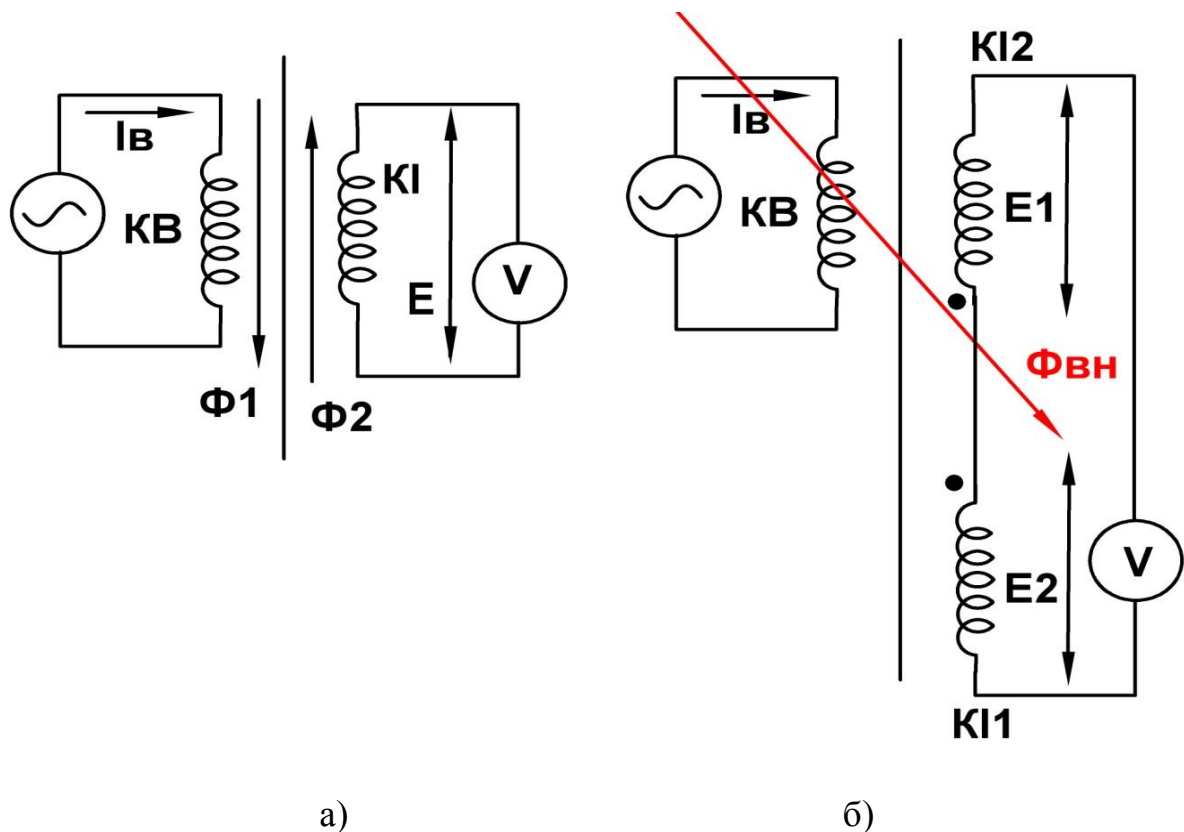


Рисунок 2.6 – Схема котушок перетворювачів абсолютного (а) та диференційного (б) [22]

Будь-яка зміна параметрів об'єкта контролю призводить до зміни вихрових струмів і їх магнітного потоку. Відповідно, будуть змінюватися

е.р.с. на вимірювальних котушках і їх різниця на виводах вимірювальної обмотки.

Такі перетворювачі більш стійкі до впливу зовнішніх факторів (температура, електромагнітні перешкоди і ін.) і набули широкого поширення.

В металоаналізаторах, як правило, використовуються двохкотушечні перетворювачі.

Котушки обмоток [23] виготовляють шляхом намотування ізолюваного тонкого мідного дроту на каркас або методом літографії. При цьому, останній спосіб не тільки більш технологічний, а також дозволяє отримати високу відтворюваність параметрів котушок при серійному виробництві. Однак таким методом неможливо отримати багатовиткові обмотки.

Взаємне розташування котушок (рис. 2.7) впливає на роботу перетворювача. В першу чергу, це взаємна ємність між обмотками збудження і вимірювальною обмотками.

Її можна зменшити, вибравши правильне взаємне розташування котушок.

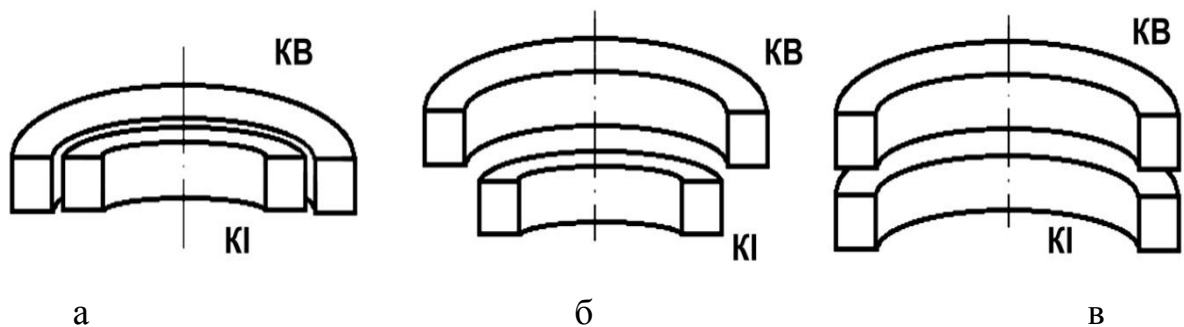


Рисунок 2.7 – Варіанти розміщення котушок з великою паразитною ємністю (а); з найменшою паразитною ємністю (б); проміжний варіант з малою паразитною ємністю (в) [22]

Як правило, використовуються коаксіальне розміщення котушок в одній площині (рис.2.7а) [22, 16].

Основним параметром котушки є її індуктивність. Індуктивність визначається конструктивними параметрами котушки (розмірами, формою, числом витків) і магнітними властивостями середовища, в якій знаходиться котушка (наприклад, наявності феро або феримагнітного осердя) [22]. Індуктивність котушки визначається виразом [23]:

$$L = \mu_a \mu_r \frac{n^2 S}{l},$$

де μ_a , μ_r – абсолютна та відповідно відносна магнітна проникність середовища, що оточує котушку, n – кількість витків котушки, l і S – геометричні розміри котушки, довжина і площа витка, відповідно.

Індуктивність котушки і частота струму, що тече через неї, визначають її індуктивний опір: $X_L = \omega L$, де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота напруги джерела живлення котушки [23].

Е.р.с. на виводах котушки індуктивності [23]

$$e = -n \frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

залежить від сили взаємодії магнітного потоку з витками котушки [23]:

$$\psi = Li,$$

або

$$\psi = n\Phi,$$

де L – індуктивність котушки, n – кількість витків, Φ – магнітний потік.

Окрім індуктивного опору, котушка має активний опір, що залежить від довжини і площі перетину мідного дроту, з якого виконані витки котушки (на низьких частотах скін-ефект не враховується) [23]:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S},$$

де ρ – питомий опір матеріалу дроту, l – довжина дроту, S – площа поперечного перерізу.

Комплексний опір [24] визначається з урахуванням всіх типів опору:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},$$

де X_C – опір, що визначається власною ємністю котушки (як правило вона мала і залежить від ємності між витками котушки, витками і осердям, витками і об'єктом контролю і т.д.), X_L – опір, що визначається індуктивністю котушки.

Таким чином, в основі вихрострумowego методу [24, 25] виявлення та розрізнення металів лежить явище збудження на поверхні досліджуваного металу вихрових струмів, які виникають внаслідок взаємодії електромагнітного поля, що наводиться в металевих об'єктах випромінювальною котушкою передавальної "антени". Ці струми створюють вторинне електромагнітне поле, яке сприймається приймальною "антенною", оброблюється електронним блоком і передається на індикаторний пристрій [26].

Інформація про досліджуваний об'єкт міститься в амплітуді, фазі та частоті сигналу прийнятого "антенною". В більшості металошукачів ідентифікація досліджуваного об'єкту здійснюється за амплітудою прийнятого сигналу [27, 28].

Сигнал перетворювача $U_{ВД}$ залежить від провідності зразка та від його магнітних властивостей [10, 29]:

$$U_{ВД} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{j=1}^{\infty} r_{j,j+1} e^{2ik \int_0^z n(\tau,f) d\tau} \right] \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-2\pi ift} dt e^{2\pi ift} df}{R} \times \quad (2.4)$$

$$\times j\omega \mu_0 \pi N_D N_3 R_0 \int_0^{\infty} \phi_1(x, \beta) J_1(x R_{3*}) J_1(x) e^{-x h_*} dx,$$

де N_D, N_3 – кількість витків у приймальній "антені" та у передавальній,

$$h_* = \frac{h_3 + h_D}{R_3}; \quad R_{3*} = \frac{R_D}{R_3}$$

$$\varphi_1(x, \beta) = \frac{\mu_r - \sqrt{x^2 + j\beta^2}}{\mu_r + \sqrt{x^2 + j\beta^2}}, \quad (2.5) [30],$$

μ_r , μ_a , σ – відносна, абсолютна магнітна проникності дослідних матеріалів та їх провідність, $x = \kappa R_3$, $\beta = R_3 \sqrt{\omega \mu_a \sigma}$ – узагальнений параметр вихрострумового контролю (ГОСТ24289 – 80) [22].

κ – параметр інтегрального перетворення, ω – кутова частота, передавальна та приймальна "антени" мають радіус R_3 та R_d відповідно, J_1 – функція Бесселя першого роду першого порядку, h_3, h_d – відстань від передавальної та приймальної "антен" до металевих зразків, $r_{j,j+1}$ – коефіцієнт відбиття від границі z_j , $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число у вакуумі, λ – довжина хвилі.

Аналіз залежності формули (2.5) від узагальненого параметру β показує, що в деяких випадках, наприклад, при знаходженні поруч (на відстані, що менша половини діаметра "антени") магнітного та немагнітного металів [31, 32], вплив магнітної проникності матеріалу об'єкта контролю значно більший, ніж вплив питомої провідності. Це пов'язано зі зміною магнітної проникності феромагнітних матеріалів в значно більших межах, ніж зі зміною їх питомої електропровідності [33, 34].

Отже, виявлення немагнітних металів, що знаходяться поряд з магнітними, пов'язане зі зміною електропровідності, а зміна магнітної проникності є фактором, що значно ускладнює процес виявлення. Тобто фактори, що впливають на вихідний сигнал, можна поділити на інформативні та заважаючі, а тому виникає задача виділення інформативних параметрів із сукупності всіх змінних.

2.2. Принцип роботи цифрової системи для аналізу металів

Структурна схема розробленої здобувачем експериментальної цифрової системи [10, 49] показана на рис. 2.8.

В розробленій системі використовуються загальні принципи роботи типового металошукача (СМ 6000 Di S2 НМ виробництва фірми White США), які доопрацьовані під динамічне знімання сигналу вихрострумowego контролю.

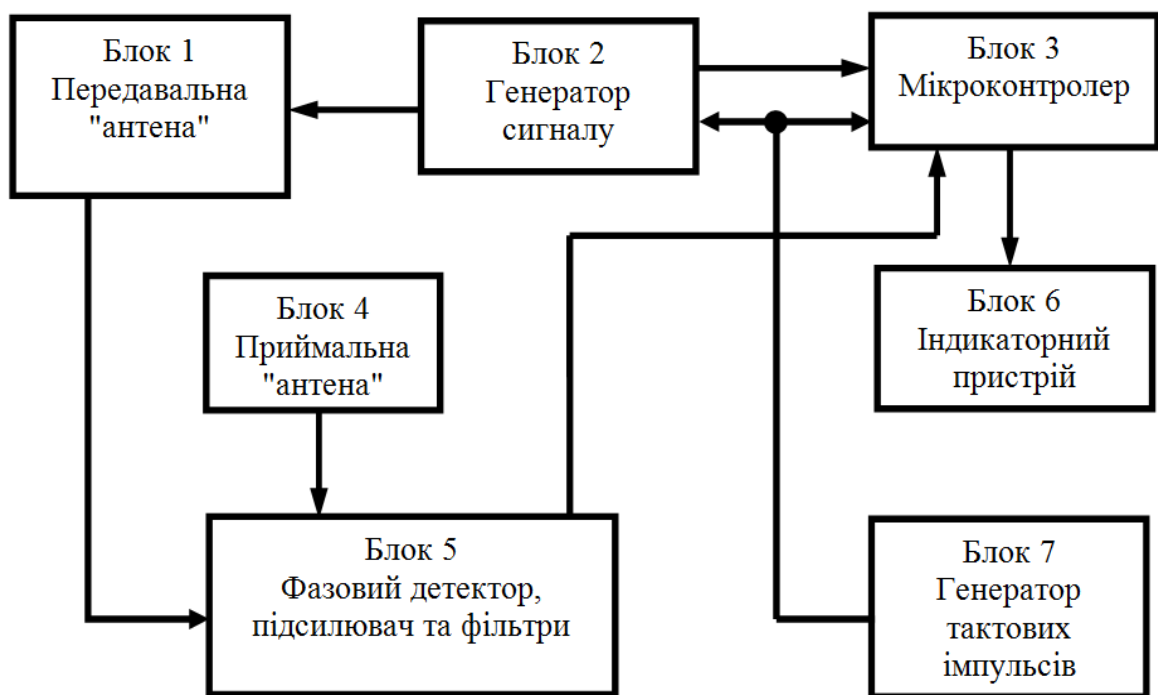


Рисунок 2.8 – Структурна схема розробленої системи [10, 26]

В системі запропоновано новий метод отримання, а також обробки отриманого сигналу за допомогою мікроконтролерного блоку, який формує зондувальний сигнал та після оцифровування обробляє його.

Запропонований метод реалізується розробленою системою, яка складається з передавальної магнітної "антени" 1, блоку фільтрів та фазового детектора 5, генератора тактових імпульсів 7, блоку обробки на мікроконтролері 3 та індикаторного пристрою 3. Блок 2 формує імпульсні

сигнали, що поступають на передавальну магнітну "антену" 1 блок 5, який налаштований на прийом сигналів від приймальної магнітної "антени" 4 з частотою сигналу радіолокаційного блоку. Таке поєднання блоків є класичним радаром із рознесеними антенами. Для забезпечення синхронізації між вузлами при обробці даних використовується генератор тактових імпульсів. Після обробки сигналів блоком 5, дані поступають до запам'ятовувального пристрою мікроконтролера [50 – 53], де отримані сигнали від дослідних зразків порівнюються з еталонними, інформація про які зберігається в запам'ятовувальному пристрої.

Макет металоаналізатора побудований на двох мікроконтролерах AVR Atmega32, які знаходяться в блоці обробки сигналу. Перший з них керує роботою радіолокаційного та вихрострумowego блоків, другий забезпечує конвертацію виміряних даних в необхідний формат для їх подальшої передачі на ноутбук. Як індикаторний пристрій використовувався ноутбук HP 4540s [54], на якому для обробки сигналів встановлений пакет математичного моделювання MATLAB [47, 55], в середовищі якого здобувачем розроблена програма розрахунку амплітудного спектру. Інформація із лабораторного макету [56 – 58] на ноутбук передається пакетами по 8 біт через роз'єм USB. Динамічний діапазон вбудованого 10-бітного АЦП мікроконтролера становить більше 48 дБ. Вимірювання спектральних властивостей сигналу проводиться по рівню -40 дБ.

Зовнішній вигляд макету системи показано на рис. 2.9 [59 – 61].

Генератор системи генерує послідовність прямокутних імпульсів типу "меандр" з частотою повторення 6,6 кГц. Навантаженням генератора є коливальний контур, у якому імпульси згладжуються до синусоїди. "Антенна" система (приймальна "антена" розміщена всередині передавальної) налаштована таким чином, що при відсутності металу біля передавальної "антени" на вході приймальної "антени" рівень сигналу

мінімальний (на приймальну "антену" наводиться синусоїдальний сигнал від передавальної).

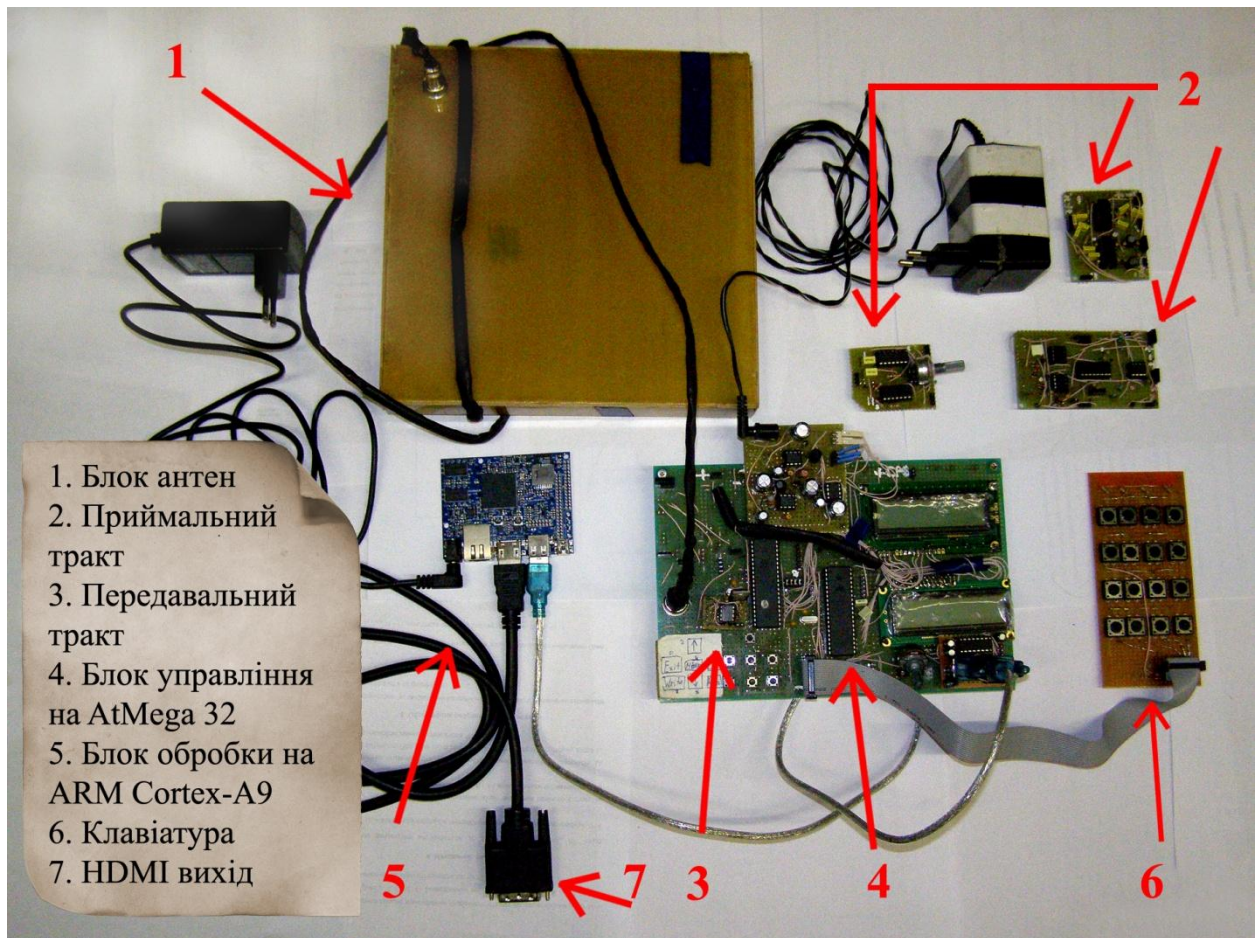


Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд макета експериментальної системи

Якщо біля передавальної "антени" появляється метал, то амплітуда наведеної синусоїди змінюється. Рух "антени" над металом викликає зміни в амплітуді синусоїди на вході приймальної "антени", цей сигнал поступає на фазовий детектор, потім на фільтри (в тому числі на інтегратор), фільтри на виході виділяють огинаючу, частота коливань у якій відповідає швидкості руху "антени" над металом. Отриманий сигнал (огинаюча) потім оброблюється різними методами для виділення інформативних ознак про метал.

Тривалість проходу зразка над "антеною", враховуючи переміщення зліва направо та навпаки, становить 1500 мс (швидкість близька до

швидкості реального сканування оператором в польових умовах), а відстань від зразка до "антени" $H = 30\text{--}100\text{ мм}$.

Зразок над магнітною "антеною" переміщується в секторі 120 градусів. Час проходження сектора 750 мсек. Зразок рухається паралельно зразкам з ліва направо та з права на ліво за допомогою приладу КД6-4 з рівномірною кутовою швидкістю, яка може регулюватися від 30 град./с до 200 град./с. Довжина штанги $L = 1000\text{ мм}$.

Наведемо характеристику дослідних зразків металів. Це три зразки металу, один з яких магнітний (сталь) та два не магнітних (мідь і алюміній), геометричні розміри зразків наведені в табл. 2.1.

Дослідний зразок розміщується над "антеною" і встановлюються параметри його переміщення. Вмикається пристрій переміщення зразка та електронна схема електромагнітного аналізатора металів. Результати вимірювань виводяться на ноутбук.

Таблиця 2.1 – Опис зразків, що використовувалися в експерименті

| № п.п. | Опис зразка |
|--------|---|
| 1 | Круглий зразок, діаметр 25мм, товщина 3мм, мідь |
| 2 | Круглий зразок, діаметр 25мм, товщина 3мм, залізо |
| 3 | Круглий зразок, діаметр 25мм, товщина 3мм, алюміній |

Для отримання достовірних вимірів з вірогідністю 0,95 [62] кількість проходжень кожного із зразків над "антеною" складає 100.

2.3. Розробка алгоритму нормування вхідних сигналів, програмне управління системою

Розробка програмного управління системою. Програмний код для мікроконтролерів експериментальної системи написано у середовищі Atmel

Studio 6.0. Для генерування вихідного сигналу та оцифровування вхідного використано внутрішній 16-бітний таймер та 10-бітний аналогово-цифровий перетворювач мікроконтролера. Для виключення збоїв у роботі програми мікроконтролера застосовано перевірки даних ядром та режим переривання з обнуленням при надходженні даних [63].

Загальні процеси роботи експериментальної системи показано на рис.2.10.

Алгоритм нормування вхідних сигналів. Необхідність нормування вхідного сигналу [64, 65] виникає з двох причин, зрозуміти які можна розглядаючи форму відбитого від об'єкту сигналу (рис. 2.11).

Амплітуда сигналу залежить від типу металу і від домінування магнітних або електричних характеристик. Амплітуди сигналів для розглянутих зразків (мідь електротехнічна, сталь 20) суттєво відрізняються одна від одної.

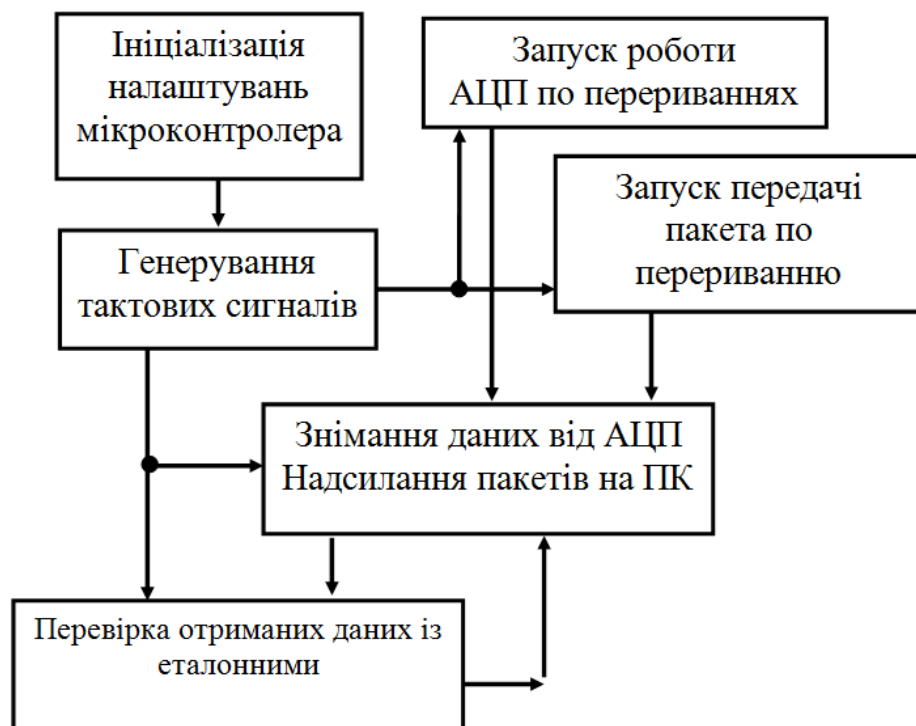


Рисунок 2.10 – Алгоритм роботи програми

Інформація про тип металу лежить в формі сигналу, порівняти сигнали можна лише тоді, якщо вони зняті в однаковому масштабі, а це неможливо без *нормування сигналів за амплітудою*.

Тривалість сигналу залежить від швидкості проходу пошукової "антени" над дослідним зразком, яка повинна бути однаковою на всьому етапі пошуку металевих зразків, але в реальних умовах роботи металоаналізатора такого не буває.

Частота дискретизації 315 Гц, відповідно тривалість 1 дискрета становить 3,174 мс.

Часова розбіжність особливо сильно проявляється із-за фізіологічних особливостей оператора, що не може з однаковою швидкістю сканувати пошуковою "антенною" над дослідною поверхнею.

Сигнали, прийняті приймальною "антенною" експериментальної системи та підсилені електронним блоком системи, після подолання порогового рівня та нормування по амплітуді мають вигляд показаний на рис. 2.12 та рис. 2.13, де зображено часові відклики для зразків із сталі 20, дюралюмінію 10, нормовані за амплітудою.

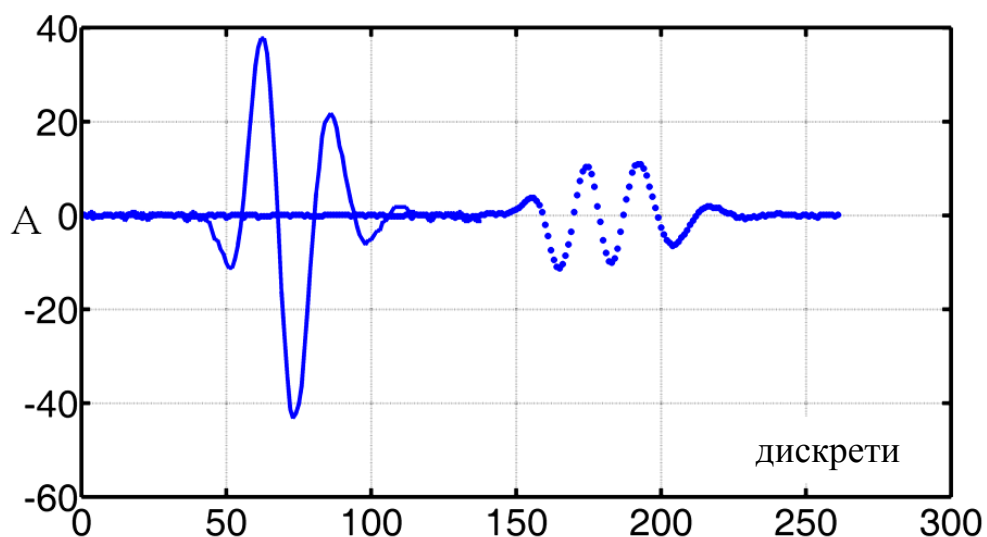


Рисунок 2.11 – Форма сигналу приймальної "антени" в залежності від типу металу, розміри зразів та швидкості сканування "антени" однакові (лінією – мідь, а точками – залізо)

При визначенні початку сигналу брався пороговий рівень більше 5% від амплітуди сигналу, що показано на рис. 2.11.

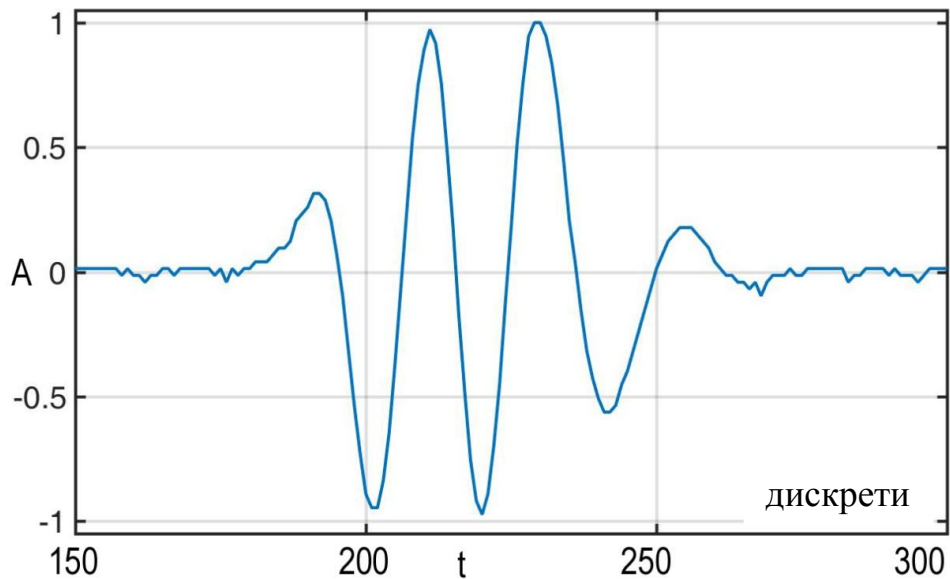


Рисунок 2.12 – Часові відклики для зразків із сталі 20

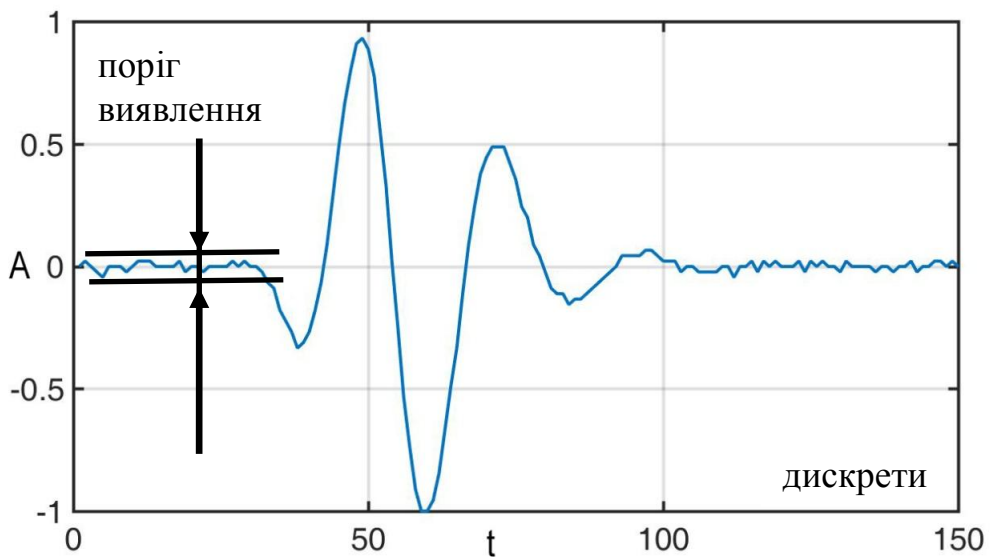


Рисунок 2.13 – Часові відклики для зразка із дюралюмінію 10

Для достовірного порівняння параметрів сигналів і в подальшому вирішення задачі розпізнавання, усі отримані сигнали потрібно нормувати (масштабувати) за тривалістю. Пропонується, як параметр нормування, використовувати відстань між двома максимумами сигналу (рис. 2.14).

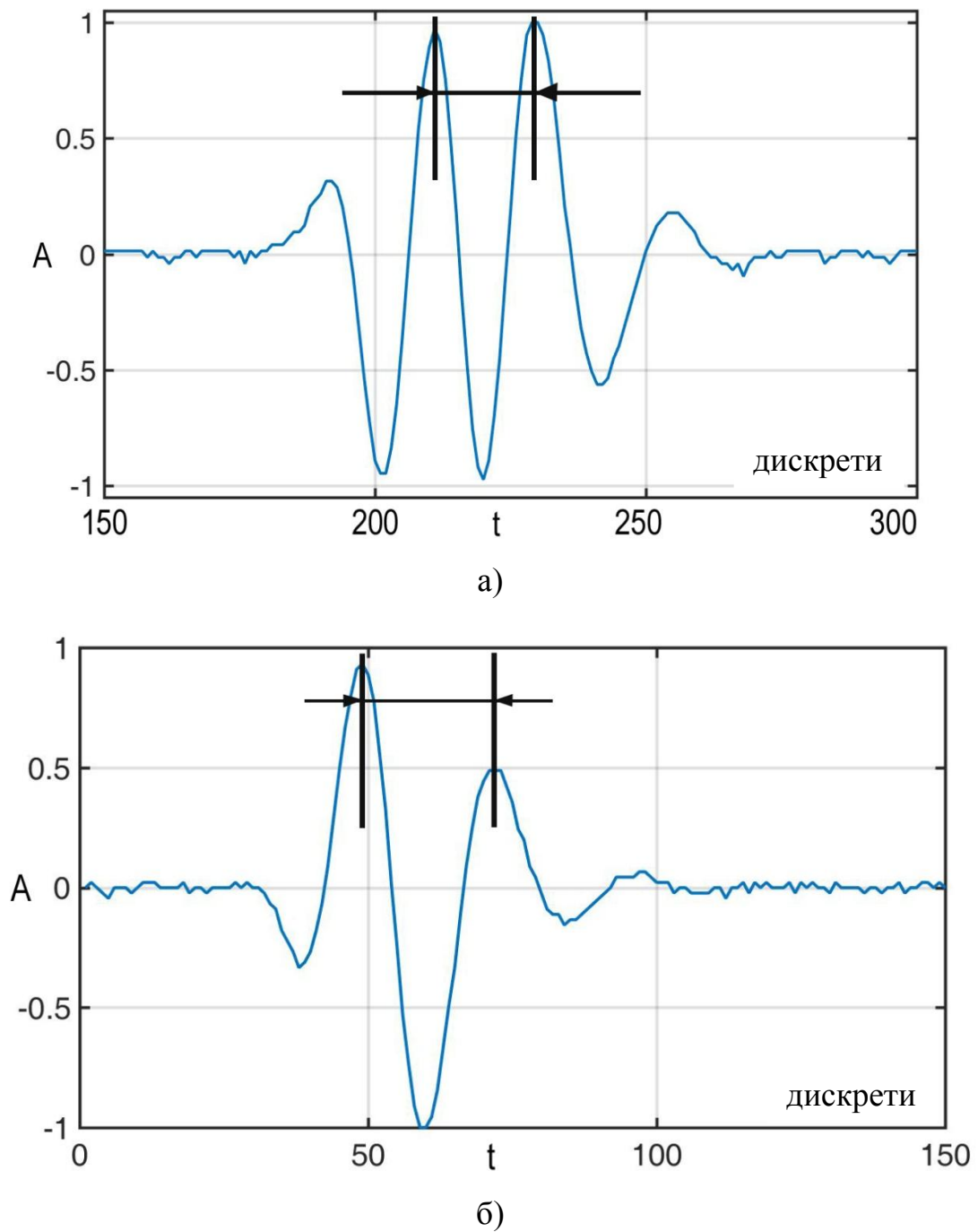


Рисунок 2.14 – Параметр нормування за тривалістю сигналу. Зразки із сталі 20 та дюралюмінію 10 (а, б)

Перше сканування є еталонним. Воно приймається як зразок, і всі останні нормуються у відповідності до нього. На цьому етапі проводиться оцифровка сигналу та вимірюється тривалість еталонного сигналу між двома максимумами (рис. 2.14). Обробка сигналу проводилася засобами

математичного пакету MATLAB [9]. Для визначення максимумів прийнятого сигналу використовувався спеціально розроблений алгоритм усереднення по трьох точках (рис 2.15). На рисунку показано, як розміщувались точки t_1 - t_3 при послідовному переборі значення амплітуди сигналу.

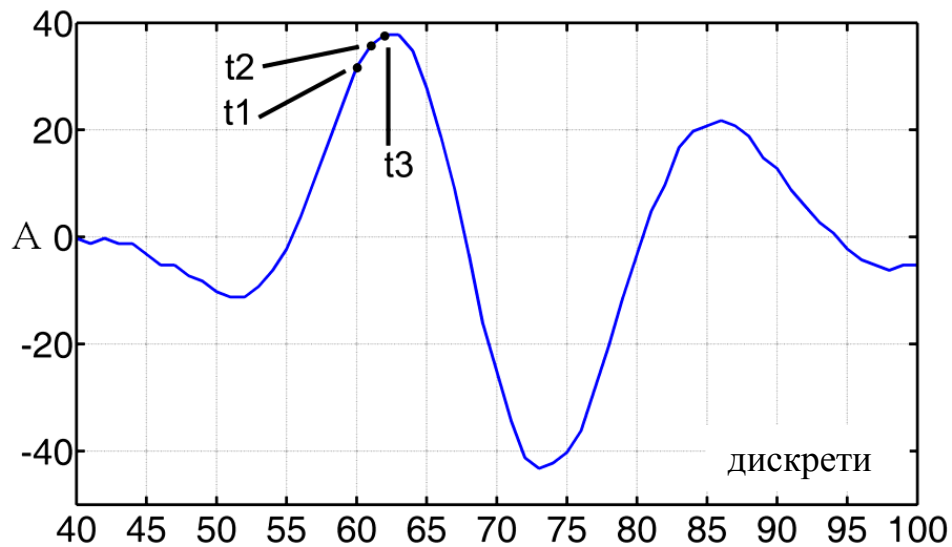


Рисунок 2.15 – Процес перебору точок t_1 – t_3 при визначення максимального значення амплітуди сигналу

Алгоритм пошуку максимуму сигналу наведено на рис. 2.16.

Алгоритм базується на вимірюванні найбільшого значення амплітуди за трьома точками (t_1 , t_2 , t_3) методом послідовного перебору усіх значень сигналу. Для базової оцінки вибиралась амплітуда в середній точці t_2 .

Можливі варіанти гострого та пологого максимуму.

Розглянемо випадок гострого максимуму. В цьому випадку амплітуда в точці t_2 більша за амплітуди наступної та попередньої точок. Номер ітерації приймається за номер шуканого максимуму.

При пологому максимумі амплітуда в точці t_2 більша за амплітуду в точці t_1 і рівна амплітуді в точці t_3 впродовж кількох ітерацій перебору дискретів сигналу. В такому випадку номером останньої ітерації при рівності t_2 та t_3 приймається за шуканий максимум.

В подальшому, тривалість сигналів нових зразків приводилась до тривалості еталонного сигналу, шляхом інтерполяції або децимації.

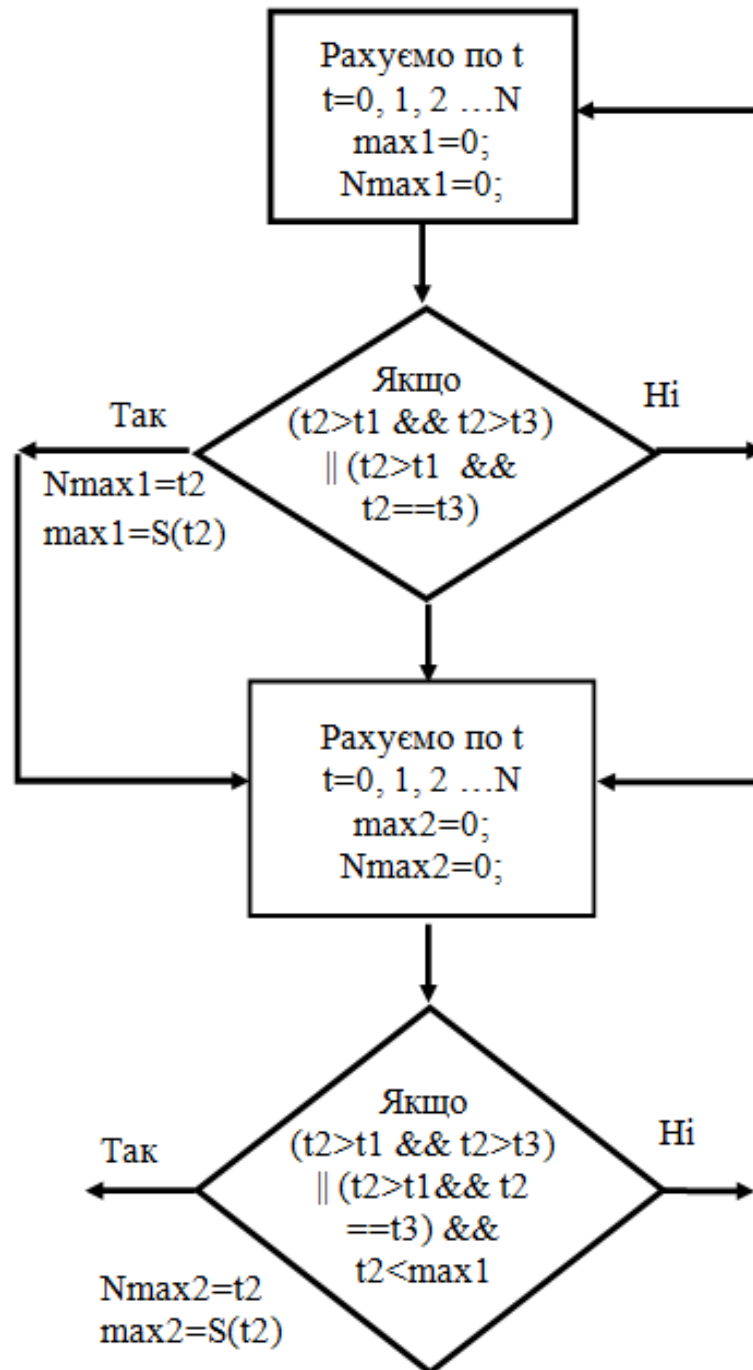


Рисунок 2.16 – Алгоритм пошуку максимумів

При децимації (зменшення частоти дискретизації) із кожних M виборок початкового сигналу відкидається $M-1$ виборка [66]:

$$y(m) = w(mM) = \sum_{k=0}^{M-1} h(k) x(mM - k),$$

$$w(n) = \sum_{k=0}^{M-1} h(k) x(n - k),$$

де M – крок перемасштабування, $x(n)$ – вхідний сигнал, $h(k)$ – цифровий фільтр захисту від накладання спектрів.

Більш ефективною є децимація з частковим підсумовуванням відліків сигналу, описана, наприклад, в [67, 68, 69], однак її адаптація для описаних відліків сигналів заслуговує додаткових досліджень.

При інтерполяції (збільшення частоти дискретизації) для кожної вибірки вхідного сигналу вводиться $L-1$ нульова вибірка, таким чином отримується новий сигнал $y(m)$ [66]:

$$y(m) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) w(m - k), \quad w(m) = \begin{cases} 0 \\ x(m / L), \end{cases} \quad m = 0, \pm L, \pm 2L, \dots$$

де $h(k)$ – цифровий фільтр захисту від накладання спектрів, L – кратність перетворення частот, що дозволило здійснювати статистичне накопичення даних.

Інформація про критичні точки сигналу використовувалася для подальшої кусково-поліноміальній апроксимації сигналу та порівняння сигналів між собою.

Таким чином, виготовлений макет експериментальної відкритої цифрової системи відповідно до розробленої структурної схеми створює умови проведення досліджень з аналізу нових методів ідентифікації металів.

2.4. Стадії підготовки системи до ідентифікації металів

Для аналізу металів необхідно виконати наступну роботу із підготовки системи контролю:

- підтвердити можливості використання динамічного вихрострумового методу на основі вихрових струмів для дистанційного розрізнення та аналізу складу різних металів без пошкодження їхньої поверхні;
- розробити методи інформаційної обробки отриманих сигналів;
- провести експериментальні дослідження з цифровою системою для розпізнавання та аналізу обраної бази металів та пояснення суті фізичної явищ, що відбуваються.

Висновки до розділу 2

1. Для відпрацювання методів обробки сигналів автором запропоновано динамічний вихрострумовий метод контролю, розроблено та виготовлено експериментальну систему. Динамічна система контролю дозволяє отримати нові інформаційні ознаки характеристик металів, а саме аналізувати форму сигналу відгуку, яка є різною для кожного типу металу.
2. Розроблено алгоритм нормування сигналів системи контролю, який дозволяє порівнювати метали між собою, не прив'язуючись до їх розмірів.
3. На основі динамічного методу контролю обґрунтовано використання нових методів аналізу складу металів, а саме використати для аналізу металів спектральний та інші методи ідентифікації.
4. Розроблено методику проведення обробки сигналів вихрострумового контролю для розрізнення металів всередині підгруп магнітних / немагнітних.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ МЕТАЛІВ ПО СИГНАЛАХ ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ

3.1. Розпізнавання складу металів в спектральній області

Дослідження використання спектрального методу як найбільш поширеного для аналізу інформаційних ознак, отриманих динамічним методом.

3.1.1. Спектральний метод аналізу сигналів відгуків від металів

Проведемо оцінку впливу середовища на ЕМ поле. Відомо, що параметри інформаційних сигналів, отриманих за рахунок вихрових струмів [9] в значній мірі залежать від питомої електропровідності та питомої магнітної проникості. Для однорідного ізотропного середовища поширення електричного поля задовольняє хвильовому рівнянню [9]

$$\Delta \overline{E} - \mu\sigma \frac{\partial \overline{E}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \overline{E}}{\partial t^2} = 0.$$

Якщо знехтувати другою похідною електричного поля, то дане рівняння перетвориться в рівняння дифузії, а якщо знехтувати першою похідною, то ми отримаємо хвильове рівняння. Для того, щоб визначити, при яких умовах можна розглядати лише хвильову частину поля або лише рівняння дифузії, запишемо хвильове рівняння в частотній області [9]:

$$\Delta \overline{E} = k^2 \overline{E}, \text{ де } k - \text{хвильове число, } k = \sqrt{-i\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon}.$$

При умові, що $\frac{\sigma}{\omega\mu} \ll 1$,

тобто, при низьких провідностях і високих частотах можна знехтувати дифузією і розглядати лише хвильову частину електромагнітного поля [10].

$$\frac{\partial^2 \overline{E}}{\partial z^2} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \overline{E}}{\partial t^2} = 0$$

Поширення поля вздовж осі z показано на рис. 3.1.

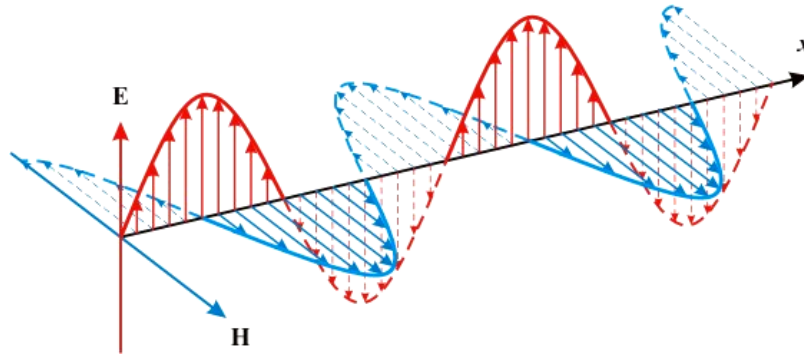


Рисунок 3.1 – Поширення поля вздовж осі z [9]

В першому наближенні багато природних середовищ можна розглядати як плоскі, а електромагнітні хвилі – як плоскі гармонічні, які поширюються перпендикулярно до площини поділу.

Приймемо, що для атмосфери $\varepsilon = 1$, а для ґрунту, з врахуванням затухання $\nabla \varepsilon$ визначається комплексною функцією $\varepsilon(z, f)$. Опис поведінки хвиль в середовищі із затуханням дає одомірне хвильове рівняння [9]

$$Y''(z, f) + k^2 \varepsilon(z, f) Y(z, f) = 0, \quad (3.1)$$

де штрихом позначим похідну, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число у вакуумі, λ –

довжина хвилі, $\varepsilon(z, f) = \begin{cases} 1, z < 0, \\ \varepsilon(z, f), z \geq 0. \end{cases}$

Розв'язок рівняння (1) в однорідному напівпросторі має вигляд [9]:

$$Y_1(z, f) = e^{ikz} + R(f)e^{-ikz} = 0,$$

де $R(f)$ – коефіцієнт відбиття падаючої хвилі.

Відповідно розв'язок рівняння (3.1) в неоднорідному середовищі із заданою діелектричною проникністю можна представити у наступному вигляді [9]:

$$Y_2(z, f) = \frac{a(z, f)}{\sqrt{n(z, f)}} e^{ik \int_0^z n(\tau, f) d\tau} + \frac{b(z, f)}{\sqrt{n(z, f)}} e^{-ik \int_0^z n(\tau, f) d\tau}, \quad (3.2)$$

де $n(z, f) = \sqrt{\varepsilon(z, f)}$, $a(z, f), b(z, f)$ – функції, для яких виконуються вимоги:

$$a'(z, f) = \frac{1}{2} \left[\frac{d}{dz} \ln(n(z, f)) \right] e^{-2ik \int_0^z n(\tau, f) d\tau} b(z, f); \quad (3.3)$$

$$b'(z, f) = \frac{1}{2} \left[\frac{d}{dz} \ln(n(z, f)) \right] e^{2ik \int_0^z n(\tau, f) d\tau} a(z, f).$$

Із умов неперервності функцій $Y_1(z, f)$, $Y_2(z, f)$ та їх похідних $Y_1'(z, f)$, $Y_2'(z, f)$, із формул (3.1), (3.2) на межі $z = 0$ отримаємо вираз для коефіцієнту відбиття [9]

$$R(f) = \frac{ik \left(\frac{Y_2(0, f)}{Y_2'(0, f)} \right) - 1}{ik \left(\frac{Y_2(0, f)}{Y_2'(0, f)} \right) + 1}. \quad (3.4)$$

Формула $b(0, f)$ із врахуванням вище вказаних змін (3.3) має вигляд [9]:

$$b(0, f) = \frac{1}{2} \int_0^\infty \frac{n'(\gamma, f)}{n(\gamma, f)} e^{2ik \int_0^\gamma n(\tau, f) d\tau} a(\gamma, f) d\gamma. \quad (3.5)$$

Для природних середовищ у наближенні геометричної оптики функція $a(0, f)$ не залежить від координати z і описує початкову хвилю. З врахуванням даної умови запишемо (3.4) у вигляді (3.5) [9]:

$$R(f) = \frac{1}{2} \int_0^\infty \frac{n'(\gamma, f)}{n(\gamma, f)} e^{2ik \int_0^\gamma n(\tau, f) d\tau} d\gamma. \quad (3.6)$$

Оскільки коефіцієнт відбиття визначається інтегралом (3.6), то існує таке розбиття (z_j) неоднорідного півпростору, для якого справджується співвідношення [9]:

$$R(f) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^\infty \frac{n'(z_j, f)}{n(z_j, f)} (z_{j+1} - z_j) e^{2ik \int_0^{z_j} n(\tau, f) d\tau}. \quad (3.7)$$

Рівняння (3.7) означає, що неоднорідний півпростір можна розглядати як набір неоднорідних шарів із границями z_j . Функція $n(z, f)$ має бути неперервною.

Враховуючи властивість неперервності функції $n(z, f)$ можна здійснити заміну виразу $2n(z_j, f)$ на $[n(z_j, f) + n(z_{j+1}, f)]$ і $n'(z_j, f)$ на $\frac{n(z_j, f) - n(z_{j+1}, f)}{z_j - z_{j+1}}$ [9].

Формула (3.7) із врахуванням вище сказаних заміन має вигляд [9]:

$$R(f) = \sum_{j=1}^\infty r_{j,j+1} e^{2ik \int_0^{z_j} n(\tau, f) d\tau}, \quad (3.8)$$

$$r_{j,j+1} = \frac{n(z_j, f) - n(z_{j+1}, f)}{n(z_j, f) + n(z_{j+1}, f)} = \frac{\sqrt{\varepsilon(z_j, f)} - \sqrt{\varepsilon(z_{j+1}, f)}}{\sqrt{\varepsilon(z_j, f)} + \sqrt{\varepsilon(z_{j+1}, f)}}.$$

Формула (3.8) дозволяє уявити відбиту хвилю у вигляді суми хвиль. Кожна із цих хвиль відбивається лише від границі (z_j) із коефіцієнтом відбиття $r_{j,j+1}$. При проходженні кожною хвилею відстані від $z = 0$ до

$z = z_j$ і назад вплив неоднорідного середовища описується множителем

$$e^{2ik \int_0^{z_j} n(\tau, f) d\tau}.$$

Якщо радіолокаційний сигнал описується дійсною функцією $s(t)$, то гармонічний склад сигналу в частотній області описується перетворенням

$$\text{Фур'є } S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad [9].$$

Спектр відбитого сигналу $S^*(f)$ в частотній області відповідає виразу $S^*(f) = R(f)S(f)$. Запишемо відбитий сигнал у часовій області [9]:

$$S^*(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\left(\sum_{j=1}^{\infty} r_{j,j+1} e^{2ik \int_0^{z_j} n(\tau, f) d\tau} \right) \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-\omega i t} dt \right] e^{\omega i t} df, \quad (3.9)$$

де $\omega = 2\pi f$.

Якщо середовище не дисперсне, то $n(z, f) = n(z)$. Враховуючи, що коефіцієнт відбиття описується інтегралом по просторовій координаті, в результаті перестановки інтегралів по незалежних координатах, відбитий сигнал можна записати в наступному вигляді [9]:

$$S^*(t) = \sum_{j=1}^{\infty} r_{j,j+1} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-2\pi i f t} dt \right] e^{2\pi i f \left[t + \frac{2}{c} \int_0^{z_j} n(\tau, f) d\tau \right]} df.$$

Вираз

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-2\pi i f t} dt \right] e^{2\pi i f \left[t + \frac{2}{c} \int_0^{z_j} n(\tau, f) d\tau \right]} df \quad \text{із (3.9)}$$

описує початковий сигнал, що зміщений у часі на величину $\frac{2}{c} \int_0^{z_j} n(\tau, f) d\tau$.

Отже, відбитий сигнал можна представити сумою парціальних сигналів, $S_j^*(t)$ [70], кожен із яких збігається з початковим, помноженим на парціальний коефіцієнт відбиття $r_{j,j+1}$ від границі z_j і зміщеним у часі на величину $\frac{2}{c} \int_0^{z_j} n(\tau, f) d\tau$.

Для опису взаємодії електромагнітної (ЕМ) хвилі із металами скористаємось методом вихрострумового контролю.

Щоб визначити залежність напруги [71, 72, 73] вихрострумового перетворювача від товщини і електромагнітних властивостей об'єкта контролю (ОК) розглянемо задачу про розподіл електромагнітного поля від збуджуючого витка радіуса R_3 із синусоїдальним струмом, розміщеним над електропровідною пластиною товщиною T на висоті h_3 (Рис. 3.2).

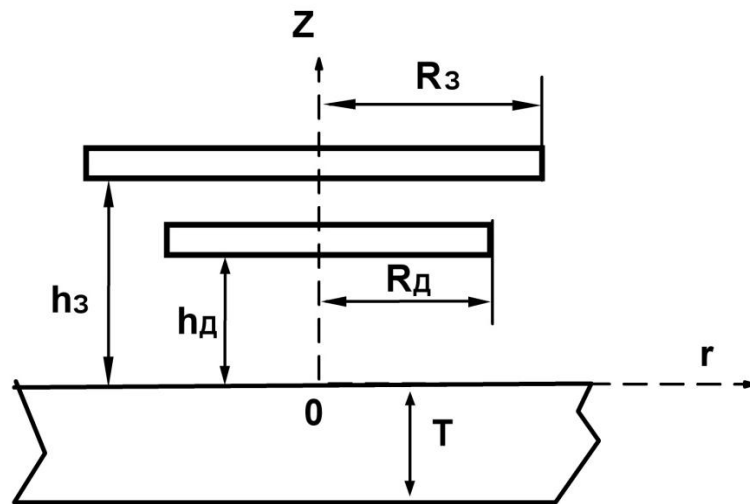


Рисунок 3.2 – "Антенний" блок над металом

Будемо використовувати циліндричну систему координат (r, φ, z) і хвильове рівняння [22]. Запишемо [22]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \bar{A}}{\partial r} \right) + \left(\frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial z^2} \right) + \left(k^2 - \frac{1}{r^2} \right) \bar{A} = -\mu_a \bar{J}_{cm} \quad (3.10)$$

Для розв'язку рівняння (3.10) використаємо перетворення Фур'є – Бесселя [22]:

$$\overline{A}^*(z, \lambda) = \int_0^{\infty} \overline{A}(r, z) r J_1(\lambda r) dr, \quad (3.11)$$

де J_1 – функція Бесселя першого роду першого порядку, λ – параметр інтегрального перетворення.

В результаті перетворення (3.11) рівняння (3.10) приймає наступний вигляд [22]:

$$\frac{\partial^2 \overline{A}^*}{\partial z^2} + q^2 \overline{A}^* = -\mu_a \overline{J}_{cm}^* \quad (3.12)$$

$$\overline{J}_{cm}^* = \int_0^{\infty} \overline{J}_{cm}(r, z) r J_1(\lambda r) dr; \quad q = \lambda^2 - k^2.$$

Граничні умови із врахуванням (3.12) для перетворених векторних потенціалів \overline{A}_1^* , \overline{A}_2^* , \overline{A}_3^* запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} \overline{A}_1^* &= \overline{A}_2^*, & \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \overline{A}_1^*}{\partial z} &= \frac{1}{\mu_a} \frac{\partial \overline{A}_2^*}{\partial z} \quad \text{при } z = 0; \\ \overline{A}_2^* &= \overline{A}_3^*, & \frac{1}{\mu_a} \frac{\partial \overline{A}_2^*}{\partial z} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \overline{A}_3^*}{\partial z} \quad \text{при } z = -T, \end{aligned} \quad (3.13)$$

де \overline{A}_1^* , \overline{A}_2^* , \overline{A}_3^* – векторні потенціали в середовищі, у якому розміщене джерело поля, в пластині та під нею відповідно.

Із врахуванням обмеженості векторних потенціалів при $z \rightarrow \pm \infty$ можна записати [22]:

$$\overline{A}_1^* = \frac{\mu_0 I}{2\lambda} R_3 J_1(\lambda R_3) \left[e^{-\lambda|z-h_3|} + \phi_1 e^{-\lambda(z+h_3)} \right],$$

$$\begin{aligned}\overline{A_2^*} &= \frac{\mu_0 I}{2q} R_3 J_1(\lambda R_3) \left[f_2 e^{qz} + \varphi_2 e^{-qz} \right] e^{-\lambda h_3}, \\ \overline{A_3^*} &= \frac{\mu_0 I}{2\lambda} R_3 J_1(\lambda R_3) f_3 e^{-\lambda(z+h_3)},\end{aligned}\quad (3.14)$$

де $\varphi_1, f_2, \varphi_2, f_3$ – функції комплексного аргументу, які знаходяться із граничних умов.

Розрахувавши вище вказані функції із системи рівнянь (3.13) і провівши зворотне перетворення Фур'є-Бесселя за формулою [22]:

$$\overline{A}(r, z) = \int_0^\infty \overline{A^*}(z, \lambda) \lambda J_1(\lambda r) d\lambda;$$

отримаємо (3.14):

$$\begin{aligned}\overline{A_1} &= \overline{A_0} + \overline{A_{ВД}}; \\ \overline{A_1} &= \frac{\mu_0 I R_3}{2} \int_0^\infty J_1(\lambda R_3) J_1(\lambda r) e^{-\lambda|z-h_3|} + \\ &\quad \varphi_1 J_1(\lambda R_3) J_1(\lambda r) e^{-\lambda(z+h_3)} d\lambda; \\ \overline{A_2} &= \frac{\mu_0 I R_3}{2q} \int_0^\infty \left[f_2 e^{qz} + \varphi_2 e^{-qz} \right] e^{-\lambda h_3} J_1(\lambda R_3) J_1(\lambda r) d\lambda; \\ \overline{A_3} &= \frac{\mu_0 I R_3}{2} \int_0^\infty f_3 e^{-\lambda(z+h_3)} J_1(\lambda R_3) J_1(\lambda r) d\lambda.\end{aligned}$$

Напруга $\overline{U_{ВД}}$, що вноситься від об'єкту контролю (ОК) у приймальну "антену" радіусом R_D , має вигляд [22]:

$$\begin{aligned}\overline{U_{ВД}} &= j2\pi \omega N_D R_D \overline{A_{ВД}} \\ \overline{U_{ВД}} &= j\omega \mu_0 \pi N_D N_3 R_D \int_0^\infty \varphi_1(x, \beta) J_1(x R_{3*}) J_1(x) e^{-x h_*} dx;\end{aligned}\quad (3.15)$$

N_D, N_3 – кількість витків у приймальній рамці та у передавальній рамці,

$$h_* = \frac{h_3 + h_D}{R_3}; \quad R_{3*} = \frac{R_D}{R_3}.$$

У нашому випадку товщина ОК більша від глибини проникнення вихрових струмів $T > \delta$. З врахуванням вище сказаної умови, функція впливу $\varphi_1(x, \beta)$ із (3.15) має наступний вигляд [30]:

$$\varphi_1(x, \beta) = \frac{\mu_r - \sqrt{x^2 + j\beta^2}}{\mu_r + \sqrt{x^2 + j\beta^2}},$$

де μ_r – відносна магнітна проникність, $x = \lambda R_3$, $\beta = R_3 \sqrt{\omega \mu_a \sigma}$, σ – провідність металу.

Якщо сигнал U_{BD} залежить від електропровідності та магнітної проникності дослідного об'єкту, то слід чекати, що його спектральні характеристики також залежать від цих же параметрів.

3.1.2. Різниця у спектрах сигналів, отриманих від різних металів.

Для простоти припустимо, що всі параметри металів, крім магнітної проникності та провідності, однакові. Тоді спектральна щільність вихідного сигналу залежить лише від $\varphi_1(\chi, \beta)$.

Розрахуємо значення функції $\varphi_1(\chi, \beta)$ впливу [74] для двох металів – сталі 20 та електротехнічної міді. Як відомо, відносна магнітна проникність сталі $\mu_r = 100$, а міді $\mu_r = 1$, провідність сталі становить 7690000 См/м, а для міді – відповідно 58100000 См/м. Отже:

$$|\varphi_{1_{сталь}}(x, \beta)| = 0,802 \quad , \quad |\varphi_{1_{мідь}}(x, \beta)| = 0,992.$$

Результати розрахунків свідчать, що різниця між функціями впливу для цих двох металів більша ніж 19,1%, відповідно такою має бути різниця в площах під кривими спектрів, результати обчислень спектрів наведено далі.

Це дозволяє за шириною спектру сигналу, прийнятого від кількох об'єктів, що знаходяться поруч, розрізнити типи металів. Інформативними ознаками дослідних спектрів є їхня ширина (за рівнем -40 дБ) та площа під обвідною [75, 76]. Дані отримувались при часі сканування "антенною" над металом 1500 мс.

Аналіз спектральних характеристик, показав, що площі під обвідною спектра для сталі (430,2 дБ·Гц), дюралюмінію (551,4 дБ·Гц) та міді (548,9 дБ·Гц) не надто суттєво відрізняються одна від одної [11]. Це накладає обмеження на ідентифікацію металів та дозволяє провести лише дихотомічне розрізнення металів на чорні та кольорові.

Експериментально перевіримо це твердження. Для цього за допомогою лабораторного макету розробленої системи [10] отримаємо відгук від двох зразків – сталі та міді, розміщених поряд, та розрахуємо його спектр (рис. 3.3 – швидкість сканування 2500 мс).

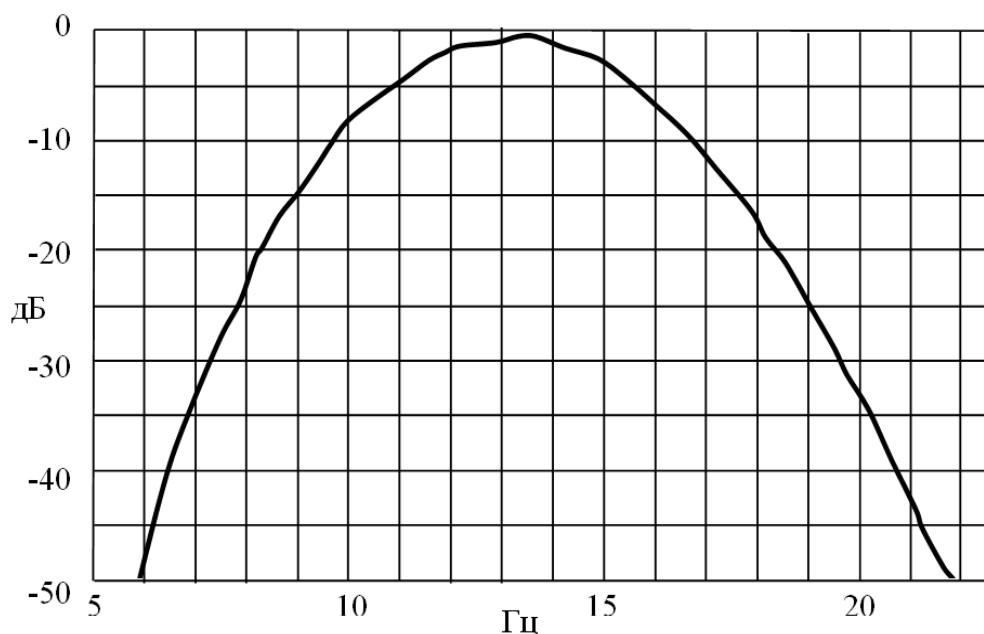


Рисунок 3.3 – Спектр сигналу від сталюого та мідного зразків

Інформативна частина спектра лежить в діапазоні 7,5...24,2 Гц, площа під обвідною спектра 427,6 дБ·Гц. В сигналі відсутня носійна частота, тому спектри від різних металів накладаються один на одного.

Завдання розрізнення металевих об'єктів зводиться до визначення перекриття спектрів в отриманому спектрі, що є аналогічним до завдання розрізнення імпульсних сигналів у часі [67]. Співвідношення між площами вимірюваного та еталонних спектрів вказує на відсотковий вміст конкретних металів (наприклад, два однакові зразки із різних металів лежали поруч).

Спектр має бути апроксимованим, потім із суми спектрів розв'язавши систему рівнянь, аналогічно [67, 69], можна визначити вміст кожного з металів.

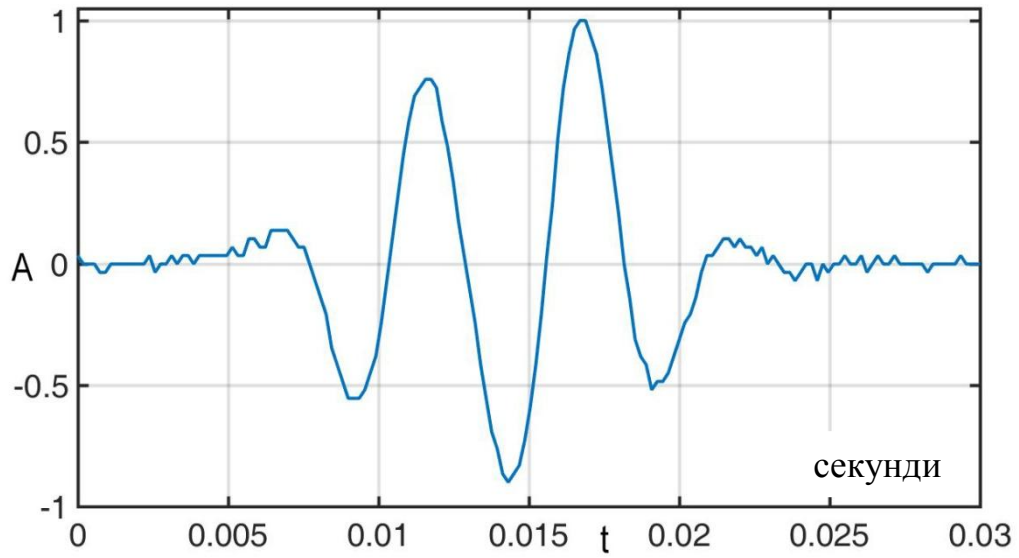
Для цього за допомогою того ж макету створимо базу спектральних відгуків від різних типів металів (сталі, міді та алюмінію), яка буде використана в подальшій обробці спектральних характеристик відкликів [77–79].

Значення базових спектральних характеристик сигналу $U_{ВД}$ для сталі, міді та для цих двох металів, що розміщені поряд, наведені у табл. 3.1. Сканування проводилося при швидкості 2500 мс.

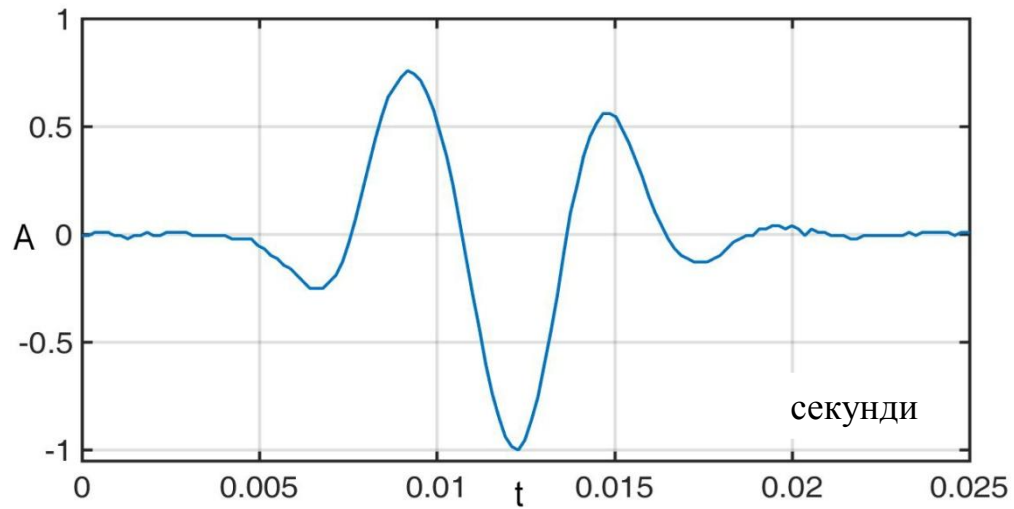
Таблиця 3.1 – Параметри базових спектральних характеристик зразків при тривалості сканування 2500 мс

| Метал | Ширина спектра по рівню –40 дБ (Гц) | Площа під обвідною спектру (дБ·Гц) |
|----------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Сталь 20 | 6,9...15,6 | 242,7 |
| Мідь електротехнічна | 3,7...15,9 | 335,2 |
| Сталь та мідь разом | 7,5...24,2 | 427,7 |

Типові форми сигналів від різних типів металів $U_{ВД}$ та їхні спектральні щільності $S(f)$ при швидкості сканування 2500 мс приведено на рис. 3.4 та рис. 3.5, відповідно.



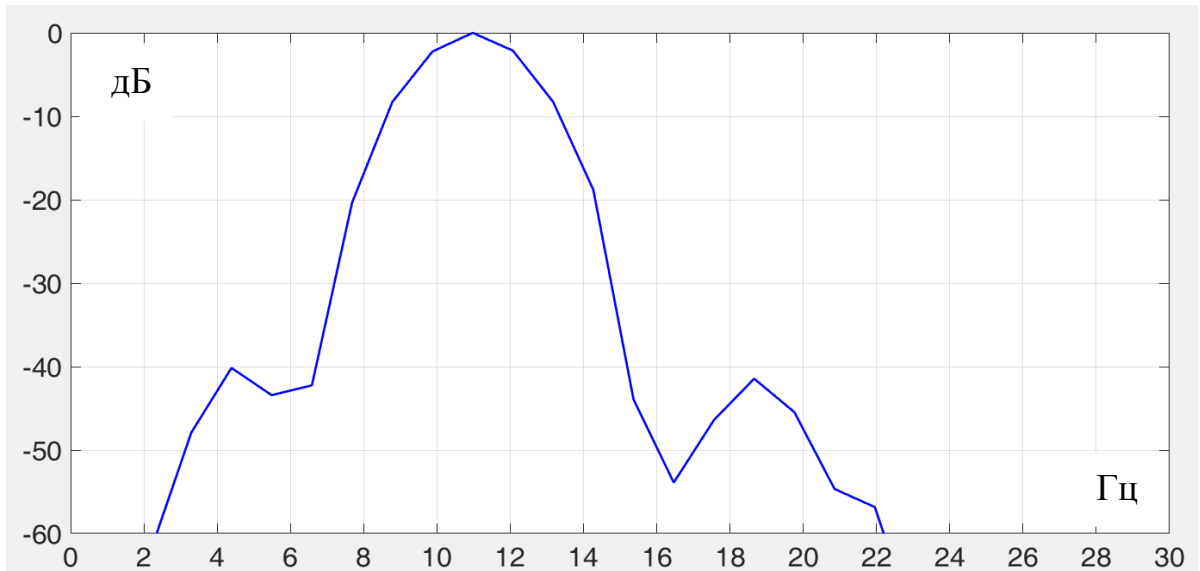
а)



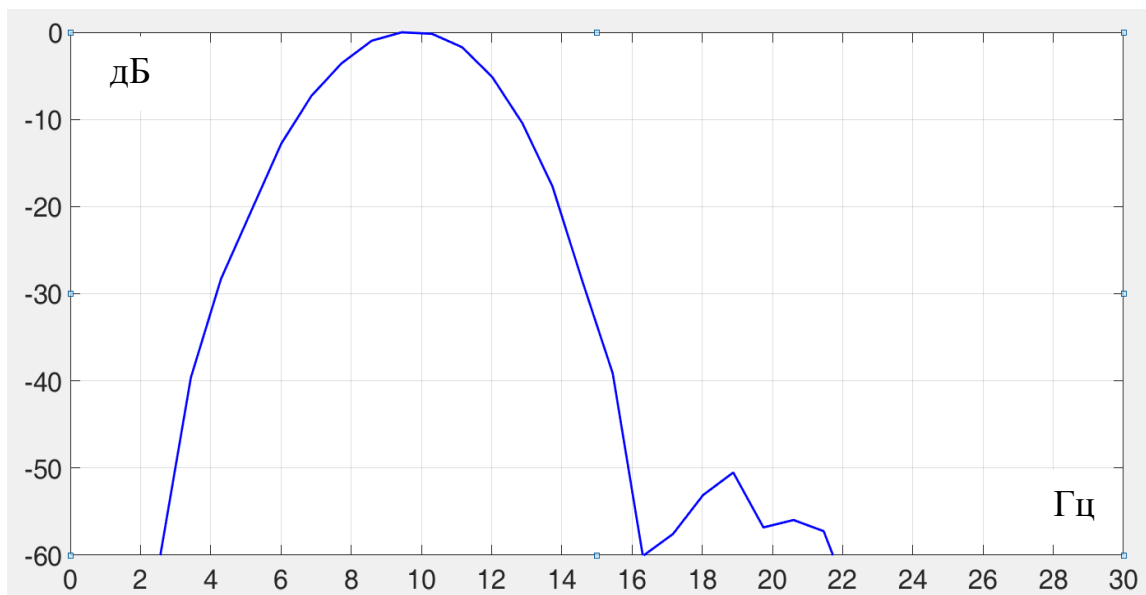
б)

Рисунок 3.4 – Типові форми сигналів $U_{ВД}$ (а – сталь 20, б – мідь електротехнічна), тривалість сканування 2500 мс

З рис. 3.4 видно, що сигнали від сталі та міді різну кількість максимумів та мінімумів. Важливою ознакою є й те, що перший максимум для сталі позитивний, а для міді негативний.



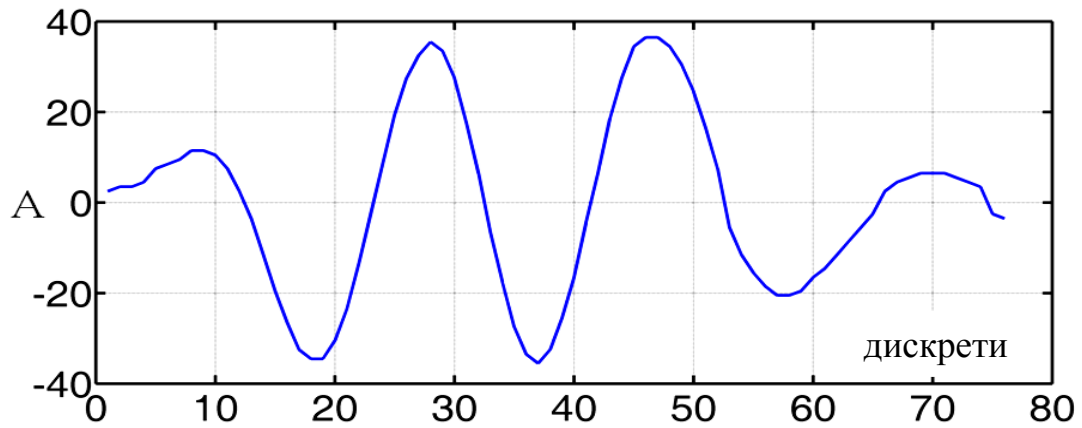
а)



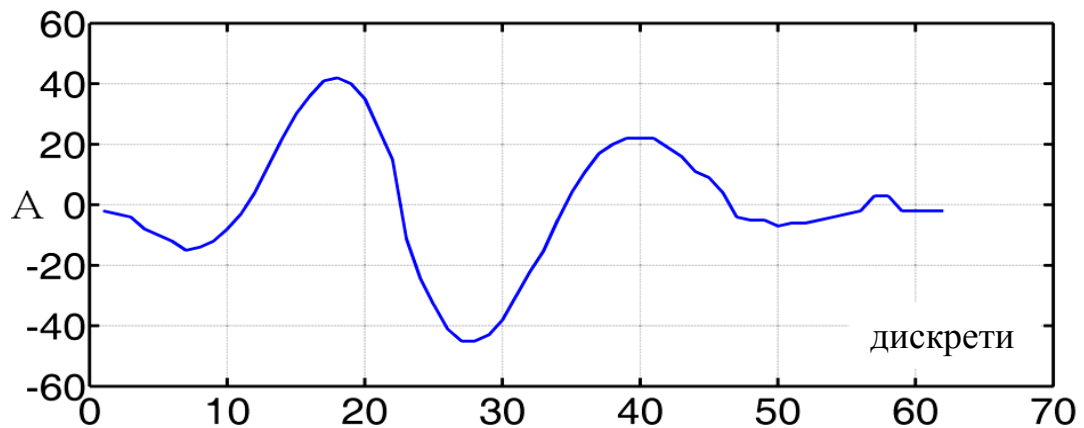
б)

Рисунок 3.5 – Спектральні щільності сигналів (а – сталь, б – мідь), при швидкості сканування 2500 мс

Аналіз [32] та проведені вимірювання показали, що час сканування дослідних зразків 2500 мс малий і не відтворює реальний час сканування, тому наступні вимірювання проводились при тривалості 1500 мс.



а)



б)

Рисунок 3.6 – Типові форми сигналів для зразків з різних металів (а – сталь, б – мідь)

Для цього випадку типові форми нормованих за амплітудою та тривалістю сигналів наведені на рис. 3.6 (а – сталь, б – мідь).

Слід підкреслити, що на відміну від інших методів ідентифікації спектральний метод дозволяє розрізнити метали, які знаходяться на відстані меншій половини діаметра "антенної" системи. Спектральні характеристики

сигналу, знятого для цього випадку, наведені на рис. 3.7. Як бачимо, інформативна частина спектра лежить в діапазоні 7,2...26,0 Гц.

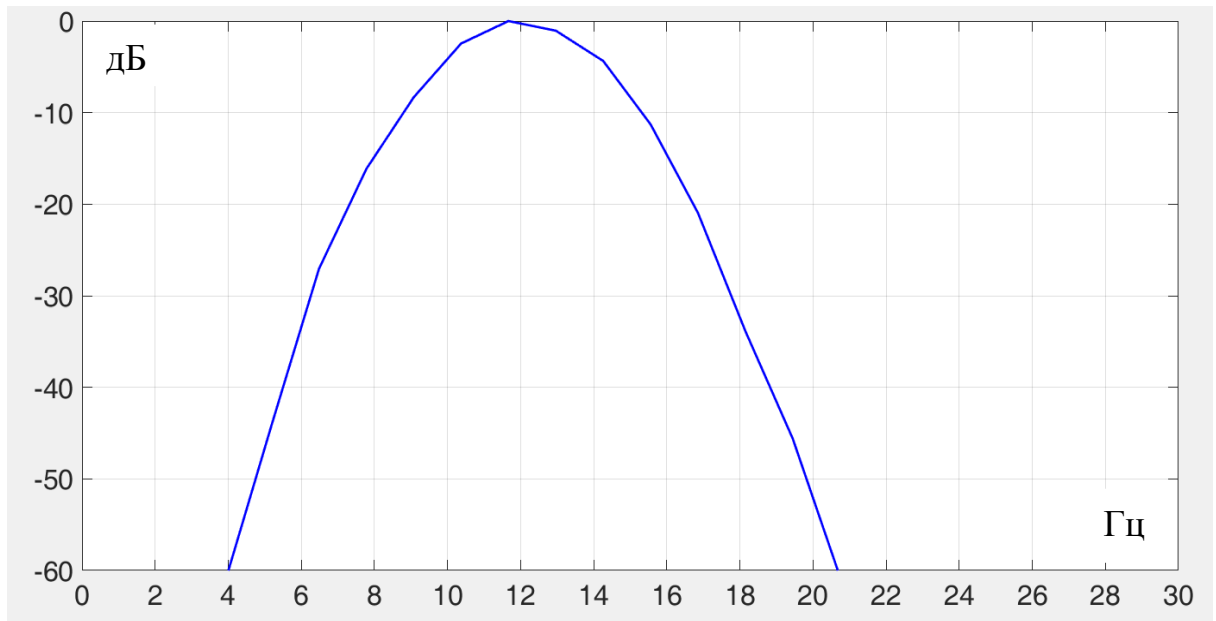


Рисунок 3.7 – Спектр сигналу від сталюого та мідного зразків, що розміщені поруч, при швидкості сканування 1500 мс

Результати вимірів основних спектральних характеристик, отриманих для часу сканування 1500 мс за 1 прохід сканування наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри базових спектральних характеристик зразків

| Метал | Смуга спектра за рівнем -40дБ (Гц) | Площа під обвідною спектру (дБ·Гц) |
|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Сталь 20 | 4,2...23,7 | 445,6 |
| Мідь електротехнічна | 6,5..28,3 | 579,5 |
| Сталь та мідь разом | 7,5...26,0 | 485,5 |
| Срібло 868 проба | 6,3...26,8 | 533,2 |
| Золото 900пр | 6,4...27,7 | 546,9 |
| Свинець | 6,3...27,7 | 565,0 |

Відсоткова різниця в параметрах наведена в табл. 3.3. Різниця розрахована відносно площ під обвідними та смуги спектрів. Різниця між площами розрахована за наступною формулою [33]:

$$\Delta S = \left| \frac{S_1 - S_2}{S_1} \right| \cdot 100\% , \quad S_1 \geq S_2 \text{ [33]},$$

де S_1, S_2 – площі під обвідними від двох різних металів, що порівнюються, ΔS – розраховане значення різниці між металами.

Різниця між смугами розрахована за наступною формулою [33]:

$$\Delta n = \left| \frac{f_{n1} - f_{n2}}{f_{n1}} \right| \cdot 100\% , \quad f_{n1} \geq f_{n2} ,$$

$$\Delta v = \left| \frac{f_{v1} - f_{v2}}{f_{v1}} \right| \cdot 100\% , \quad f_{v1} \geq f_{v2} ,$$

$$\Delta f = \frac{\Delta n + \Delta v}{2} ,$$

де $f_{n1}, f_{n2}, f_{v1}, f_{v2}$ – нижня та верхня смуги спектра двох металів, що порівнюються, Δf – різниця в ширині спектра за рівнем -40дБ.

Таблиця 3.3 – Розрахована різниця в параметрах між металами

| Метали, що порівнюються | Різниця площ під обвідними, ΔS | Різниця в ширині спектра, Δf |
|-------------------------|--|--------------------------------------|
| Мідь та срібло | 7,80% | 4,48% |
| Мідь та золото | 5,60% | 1,67% |
| Мідь та титан | 15,80% | 11,96% |
| Мідь та свинець | 2,50% | 1,99% |
| Мідь та алюміній | 8,92% | 7,80% |

Таким чином, в підрозділі обґрунтована та експериментально підтверджена можливість використання методів спектрального аналізу для розрізнення металів, який дозволяє ідентифікувати тип металу, якщо два

предмети із різних металів знаходяться один від одного на відстані, меншій половини діаметра приймальної "антени".

Показана можливість застосування спектрального методу для ідентифікації металів при використанні обладнання для вимірювання спектральних характеристик, яка має точність вимірювання не гірше 1 відсотка.

3.2. Існуючі методи обробки сигналів, подібних до експериментальних

Відбитий сигнал на вході системи за формою та за частотним діапазоном подібний до звукових сигналів. Тому доцільно перевірити можливість застосування метаматичних алгоритмів оброблення звукових сигналів до задачі, яка вирішується в дисертації.

Сигнал на вході системи подібний до мовного сигналу. Ідентифікація особистості, в нашому випадку типу металу, здійснюється за параметрами, по яких формують вектор властивостей (або вектор ознак) . З математичної точки зору це може бути як вектор у просторі, так і набір функцій або одна функція.

Є досить багато методів для формування вектора властивостей. Найбільш популярним є підхід кепстральних коефіцієнтів. Існує дві основні технології отримання з сигналу вектора властивостей, що складається з кепстральних коефіцієнтів: на основі кепстральних коефіцієнтів тональної частоти (Mel-Frequency Cepstral Coefficients – MFCC) і на основі кепстральних коефіцієнтів лінійного передбачення (Linear Predictive Cepstral Coefficients - LPCC) [80, 48].

Одним з найбільш широко застосовуваних підходів для визначення ознак є підхід на основі коефіцієнтів лінійного передбачення (Linear Predictive Cepstral Coefficients – LPCC).

3.3. Застосування методу лінійного передбачення для дихотомічного розрізнення металів

3.3.1. Особливості методу лінійного передбачення

Важливим етапом процесу класифікації металів за даними системи є виділення ознак. Кожен вхідний сигнал розглядають як вектор ознак, який характеризує сигнал.

Коефіцієнти лінійного передбачення [81, 82] методу LPCC є ваговими коефіцієнтами моделі лінійного передбачення (АР-модель):

$$s(k) = \sum_{i=1}^p d_i s(k-i) + qv(k), \quad (3.16)$$

де $s(k)$ – k -й відлік сигналу; $d_i, i = \overline{1, p}$ – параметри АР-моделі; q – дисперсія вхідного шуму збудження; $v(k)$ – некорельована послідовність гауссівських векторів $N(0,1)$.

Із виразу (3.16) витікає, що кожен відлік сигналу є лінійною комбінацією p попередніх відліків сигналу і відліку активної послідовності.

Передавальна функція АР-моделі порядку p записується в вигляді [48]:

$$H(z) = q \cdot \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^p d_i z^{-i}}. \quad (3.17)$$

Завдання аналізу на основі моделі лінійного передбачення – отримати параметри, необхідні для відтворення вихідного сигналу.

Квадратична помилка апроксимації повинна бути мінімальною, тому коефіцієнти лінійного передбачення визначаються з наступної системи нормальних рівнянь, яка в матричному вигляді може бути записана, як [48]:

$$\overline{R}_i \cdot \overline{a}_i = \overline{r}_i, \quad (3.18)$$

$$\overline{R}_i = \begin{bmatrix} r_0 & \cdots & r_{p-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p-1} & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.19)$$

$$\overline{a}_i = [\overline{a}_i(1) \quad \cdots \quad \overline{a}_i(p)]^T, \quad (3.20)$$

$$\overline{r}_i = [\overline{r}_1 \quad \cdots \quad \overline{r}_p]^T, \quad (3.21)$$

де r_k – k -й коефіцієнт автокореляції сигналу, зваженого віконною функцією w (зазвичай використовують вікно Хеммінга).

У сучасних системах сигнал формується декілька разів, і на основі отриманих реалізацій формується вектор ознак \overline{a} .

Метод побудови еталонів полягає в тому, що для кожного класу по навчальній вибірці будується еталон, який має значення ознак [48]:

$$m^{(j)} = [m_1^{(j)} \quad \cdots \quad m_N^{(j)}], \quad (3.22)$$

$$m_k^{(j)} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K m_k^{(j)}, \quad (3.23)$$

де K – кількість об'єктів даного образу в навчальній вибірці, i – номер ознаки.

По суті, еталон – це усереднений за навчальною вибіркою абстрактний об'єкт. Абстрактним він є тому, що може не збігатися не тільки ні з одним об'єктом навчальної вибірки, а й ні з одним об'єктом генеральної сукупності, який і заноситься в базу даних. Якість обраних ознак перевіряється при розпізнаванні на реалізаціях навчальної вибірки.

Достатність обраних ознак можна оцінити, використовуючи критерій Фішера, який служить одновимірним критерієм достатності j -ої ознаки для поділу класів об'єктів k та l [37]:

$$\gamma_i = \frac{(m_i^1 - m_i^2)^2}{D_i^1 - D_i^2}, \quad (3.24)$$

де m_i^1, m_i^2 – середнє значення i -ї ознаки; D_i^1, D_i^2 – дисперсії значень i -ї ознаки.

Після проведення розрахунків отримуємо два вектори – вектор \bar{a} коефіцієнтів лінійного передбачення та вектор γ_i із коефіцієнтами, що розраховані по критерію Фішера [37]:

$$a_i = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix}, \gamma_i = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_p \end{bmatrix}.$$

Задавши деякі значення порогу γ_i , можна допустити, що j -та ознака достатня для розділення класів k та l , якщо виконується умова $\Phi_F \geq \gamma_i$ [34].

Після цього, для порівняння металів використовуються тільки ті коефіцієнти вектора \bar{a} , номер яких відповідний номеру коефіцієнта із вектора γ_i [37].

3.3.2 Класифікація об'єкту

На цьому етапі проводиться порівняльний аналіз ознак отриманого сигналу з ознаками класів об'єктів [34]. Аналіз може проводитися різними способами, починаючи від простих статистичних методів і закінчуючи нейронною мережею і/або складною системою штучного інтелекту. При цьому для порівняння з високою точністю розпізнавання можуть використовуватися відразу кілька способів.

Найпростіший із способів – це порівняння відстаней між векторами – вихідними та еталонними. Мінімальна відстань між векторами показує подібність зразка та еталона. При побудові вектора може бути використано різну кількість ознак. При збільшенні кількості ознак можна отримати більш достовірний результат, але часу обробки і ресурсів пам'яті ЕОМ потрібно буде більше. При зменшенні кількості ознак достовірність погіршується, але результат досягається швидше. Якщо при розпізнаванні обмежити

максимально можливу відстань між векторами, то представлений зразок при великій кількості ознак може не потрапити ні в один з наявних класів.

Розпізнавання здійснюється наступним чином. На вхід системи надходить об'єкт \bar{a} , приналежність якого до того чи іншого образу системи невідома. Від цього об'єкта вимірюються відстані до еталонів всіх образів, і система відносить x до того образу, відстань до еталону якого мінімальна. Відстань вимірюється в тій метриці, яка введена для вирішення певної задачі розпізнавання.

3.3.3. Опис навчальної вибірки класів об'єктів – таблиці магнітних та немагнітних металів

Для роботи системи необхідно створити базу даних з вибірки різних зразків об'єктів (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Опис зразків, що використовувались в експериментах

| №п.п | Опис зразка |
|------|---|
| 1 | Круглий зразок, діаметр 25 мм, товщина 3 мм, мідь |
| 2 | Круглий зразок, діаметр 25 мм, товщина 3 мм, залізо |
| 3 | Прямокутний зразок, розмір 20x20 мм, товщина 2 мм, мідь |
| 4 | Прямокутний зразок, розмір 20x30 мм, товщина 2 мм, мідь |
| 5 | Прямокутний зразок, розмір 20x40 мм, товщина 2 мм, мідь |
| 6 | Прямокутний зразок, розмір 20x60 мм, товщина 2 мм, мідь |
| 7 | Прямокутний зразок, розмір 20x20 мм, товщина 2 мм, залізо |
| 8 | Прямокутний зразок, розмір 20x30 мм, товщина 2 мм, залізо |
| 9 | Прямокутний зразок, розмір 20x40 мм, товщина 2 мм, залізо |
| 10 | Прямокутний зразок, розмір 20x60 мм, товщина 2 мм, залізо |
| 11 | Мідь монета крейцер Австроугорської імперії, початок 18ст |
| 12 | Мідь, монета 2 копійки Російська імперія, Микола 2. |

На етапі навчання, тобто створення бази еталонних образів, досліджувалися сигнали від зразків №1 – №10. Відстань від зразка до "антенної" системи становить 60 мм. Для кожного з металів, в якості навчальних зразків для отримання базових сигналів було взято зразок №1, №3, №4 для міді електротехнічної та №2, №7, №8 – для сталі 20. Проведено розрахунок коефіцієнтів лінійного передбачення для кожного із зразків, для них визначено математичне очікування та дисперсію, по яким розраховано коефіцієнти критерію Фішера.

Експериментально підбиралися різні порогові значення коефіцієнтів Фішера і за такими ж порядковими номерами як інформативні бралися коефіцієнти лінійного передбачення (КЛП) дослідних зразків та еталонних зразків.

Всі експерименти проводились при відсутності перешкод та за умов достатньої амплітуди сигналу, який значно перевищує амплітуду шумів (в моменти проходження зразка за межами "антени" сигнал шумів осцилографа).

Результати аналізу наведено у табл. 3.5 – табл. 3.9. Розпізнавання проводилось для різних випадків: розпізнавання пачки сигналів (табл. 3.5), розпізнавання пачки сигналів із вирізаними часовими паузами між відкликами (табл. 3.6), розпізнавання одиночних сигналів.

H_1, H_2 – перша та друга гіпотези (у таблицях "+" позначалась отримана гіпотеза), $\Delta 1a, \Delta 1b, \Delta 2a, \Delta 2b$ – відстані між вектором еталонних металів (сталь – 1, мідь – 2) та новим металом (сталь – а, мідь – б). Рішення про результат приймалось по мінімальній відстані між вектором ознак еталонного металу та вектором ознак нового металу ($\Delta 1a, \Delta 1b, \Delta 2a, \Delta 2b$), рис. 3.8.

У табл. 3.5 наведено результати аналізу металів за коефіцієнтами по критерію Фішера більше 0,2. Для розпізнавання бралася пачка вхідних сигналів (по 10 проходів "антени" над металом). Часові паузи між відбитими

сигналами присутні. Період сканування $T=1500$ мс. Відстань до зразків – 75мм. Результати розпізнавання невірні.

В табл. 3.5 – табл. 3.9 плюсом позначено вибрану гіпотезу по найкоротшому вектору.

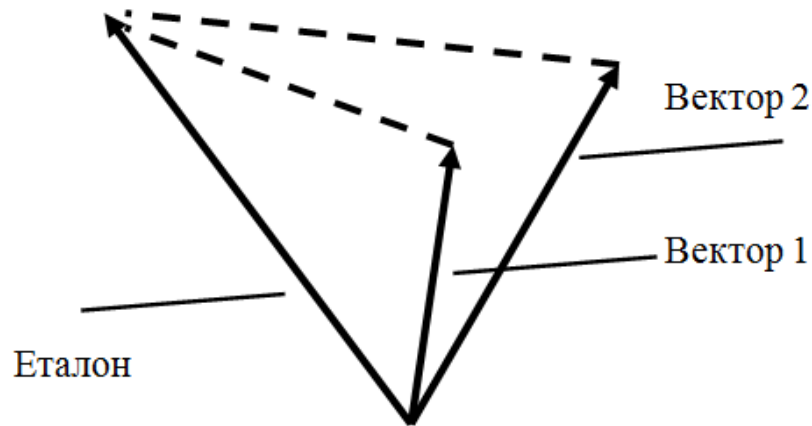


Рисунок 3.8 – Відстань між вектором ознак еталонного металу та вектором ознак дослідного металу

Таблиця 3.5 – Результати аналізу металів, сигнал від еталонного металу та пачка сигналів із присутніми паузами від нових дослідних металів

| Зразки \ Н гіпотеза | H_1 Сталь | H_2 Мідь | Відстань між векторами, Δa . Сталь, дослідна | Відстань між векторами, Δb . Мідь, дослідна |
|----------------------------|----------------|---------------|--|---|
| $\Delta 1$, сталь, еталон | + | | $\Delta 1a - 0,2755$ | $\Delta 1b - 0,3690$ |
| $\Delta 2$, мідь, еталон | + | | $\Delta 2a - 0,4203$ | $\Delta 2b - 0,5401$ |

У табл 3.6 наведено результати аналізу металів за коефіцієнтами по критерію Фішера, більше 0,15. Для розпізнавання (табл. 3.6) бралася пачка вхідних сигналів (по 10 проходів "антени" над металом). Часові паузи між відбитими сигналами вирізано. Період сканування $T=1500$ мс. Відстань до зразків – 75мм. Результати розпізнавання невірні.

Таблиця 3.6 – Результати аналізу металів, сигнал від еталонного металу та пачка сигналів без часових пауз від нових дослідних металів

| Зразки \ Н гіпотеза | H_1 Сталь | H_2 Мідь | Відстань між векторами, Δ_a . Сталь, дослідна | Відстань між векторами, Δ_b . Мідь, дослідна |
|----------------------------|----------------|---------------|---|--|
| $\Delta 1$, сталь, еталон | + | | $\Delta 1a - 0,2823$ | $\Delta 1b - 0,3953$ |
| $\Delta 2$, мідь, еталон | + | | $\Delta 2a - 0,3346$ | $\Delta 2b - 0,3947$ |

У табл. 3.7 наведено результати аналізу металів при тих же умовах, що і в табл. 3.6, але збільшено значення порогового рівня для коефіцієнтів по критерію Фішера, більше 0,2. Результати розпізнавання невірні, збільшення порогового рівня для вибору коефіцієнтів по критерію Фішера при таких умовах експерименту не забезпечило правильного розпізнавання. У наступних експериментах умови змінено (табл. 3.8, табл. 3.9).

Таблиця 3.7 – Результати аналізу металів, сигнал від еталонного металу та одиничні сигнали пауз від нових дослідних металів

| Зразки \ Н гіпотеза | H_1 Сталь | H_2 Мідь | Відстань між векторами, Δ_a . Сталь, дослідна | Відстань між векторами, Δ_b . Мідь, дослідна |
|----------------------------|----------------|---------------|---|--|
| $\Delta 1$, сталь, еталон | + | | $\Delta 1a - 0,3497$ | $\Delta 1b - 0,4969$ |
| $\Delta 2$, мідь, еталон | + | | $\Delta 2a - 0,3179$ | $\Delta 2b - 0,5362$ |

Результати розрізнення, наведені в табл. 3.9, показали, що можна коректно порівнювати сигнали, отримані при однаковій швидкості сканування.

У табл 3.8 наведено результати аналізу металів за коефіцієнтами по критерію Фішера більше 0,2. Для еталонної вибірки бралася пачка вхідних сигналів (по 10 проходів "антени" над металом), а для невідомої пачка із

періодом сканування 2500 мс (в еталонної пачки період 1500 мс) . Часові паузи між відбитими сигналами вирізано. Відстань до зразків – 75 мм. Результати розпізнавання невірні при усіх значеннях критерію Фішера.

Таблиця 3.8 – Результати аналізу металів, сигнал від еталонного металу та пачка сигналів без часових пауз від нових дослідних металів

| Зразки \ Н гіпотеза | H_1 Сталь | H_2 Мідь | Відстань між векторами, Δa Сталь, дослідна | Відстань між векторами, Δb Мідь, дослідна |
|----------------------------|----------------|---------------|---|--|
| $\Delta 1$, сталь, еталон | + | | $\Delta 1a - 0,1399$ | $\Delta 1b - 0,1932$ |
| $\Delta 2$, мідь, еталон | + | | $\Delta 2a - 0,1982$ | $\Delta 2b - 0,2539$ |

У табл. 3.9 наведено результати аналізу металів за коефіцієнтами по критерію Фішера більше 1,5. Для розпізнавання бралися одиничні відклики відбитого сигналу (в еталонній вибірці відклики перемасштабовані до еталонного періоду та усереднені), а у невідомій вибірці відклики також перемасштабовані до еталонного періоду. Період сканування $T=1500$ мс. Відстань до зразків – 75 мм. Результати розпізнавання вірні після збільшення порогового рівня.

Таблиця 3.9 – Результати аналізу металів

| Зразки \ Н гіпотеза | H_1 Сталь | H_2 Мідь | Відстань між векторами, Δa Сталь, досліна | Відстань між векторами, Δb Мідь, дослідна |
|---|----------------|---------------|--|--|
| а | Б | в | Г | д |
| $\Delta 1$, сталь, пласт 2х4 см 2000 мс | + | | $\Delta 1a - 0,3112$ | $\Delta 1b - 0,3713$ |
| $\Delta 2$, мідь, крейцер, Аустр.-Угор. імп.18ст. | | + | $\Delta 2a - 0,8759$ | $\Delta 2b - 0,6281$ |

Продовження таблиці 3.9

| а | Б | в | Г | д |
|--|---|---|----------------------|----------------------|
| $\Delta 1$, сталь, диск, відстань 7,5см | + | | $\Delta 1a - 0,7575$ | $\Delta 1б - 0,8759$ |
| $\Delta 2$, мідь, 2 коп Рос. імп. 20ст. 1 відклик | + | | $\Delta 2a - 0,6820$ | $\Delta 2б - 0,9742$ |
| $\Delta 2$, мідь, 2 коп Рос. імп. 20ст, усереднив 10 відкл. | + | | $\Delta 2a - 0,4159$ | $\Delta 2б - 0,4177$ |
| $\Delta 2$, $\Phi > 2$, мідь 2 коп Рос. імп. 20ст, усереднив 10 відкл. | | + | $\Delta 2a - 0,3651$ | $\Delta 2б - 0,1984$ |

Результати вимірів, наведені в табл. 3.5 – 3.9, проводились шляхом порівняння відстані між еталонними векторами ознак та векторами ознак нових металів. Результати розрізнення металів вірні, якщо для отримання вектора ознак від нового металу бралися одиничні відклики сигналу із вирізанням часових пауз та збільшенням порогового рівня по критерію Фішера, що видно із табл. 3.9, на прикладі розрізнення мідного зразка – мідної монети початку 20 ст. імператора Миколи 2-го.

3.4. Розпізнавання складу металів в часовій області

Як показано в розділі 2, спектральний метод аналізу відбитого сигналу системи дозволяє провести аналіз типу металу. Але для цього необхідно мати високочутливий спектроаналізатор, який дозволить ідентифікувати різниці в спектрах з похибною не вище 1%. Тому виникла необхідність в розробці інших методів, наприклад, в аналізі сигналу в часовій області.

3.4.1. Аналіз сигналів в часовій області диференційним методом.

Методи апроксимації сигналу. Для проведення аналізу сигналу в часовій області [83] важливо отримати його математичний вираз. Він же дозволить відбиті сигнали представити у зручній та наглядній формі.

Основу математичних моделей багатьох процесів і явищ у фізиці, хімії, біології, економіці та інших областях складають рівняння різного виду: нелінійні рівняння, диференційні рівняння і т.д. Для вирішення подібних рівнянь необхідно мати можливість обчислювати значення функцій, що входять в опис математичної моделі розглянутого процесу або явища при довільному значенні аргументу. Для складних моделей подібні обчислення можуть бути трудомісткими, навіть при використанні обчислювальної техніки.

Використовувані в математичних моделях функції можуть бути задані як аналітичним способом (у вигляді формули), так і табличним, при якому функція відома тільки для певних дискретних значеннях аргументу. Зокрема, якщо функціональна залежність отримана в результаті розрахунків, проведених на ЕОМ, або в процесі вимірювань, здійснених в рамках будь-якого експерименту, то вона виявляється заданою саме табличним способом. На практиці можуть знадобитися значення функції і в інших точках, відмінних від тих, що задані в таблиці. Однак, отримати ці значення можна тільки шляхом складних розрахунків або проведенням дорогих експериментів.

Таким чином, з точки зору економії часу і коштів, приходимо до задачі обчислення наближених значень функції при будь-якому значенні аргументу на основі наявних табличних даних.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & x_0 & x_0^2 & \dots & x_0^n \\ 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^n \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^n \end{pmatrix}.$$

Система лінійних алгебраїчних рівнянь (3.27) щодо невідомих матиме рішення, якщо визначник системи (визначник матриці A) відмінний від нуля [86, 87]:

$$\det A = \prod_{\substack{i, j = 0 \\ (i \neq j)}}^n (x_i - x_j) \neq 0.$$

Видно, що $\det A \neq 0$, якщо серед вузлів x_i немає співпадаючих.

Формально рішення системи рівнянь (3.27) може бути записано в матричному вигляді: $c = A^{-1} \cdot y$,

де A^{-1} – обернена матриця ($A^{-1} \cdot A = I$, I – одинична діагональна матриця) [86, 87].

Відомо, що через $n + 1$ точок на площині можна провести криву, яка є графіком полінома ступеня n , причому такий поліном єдиний, якщо на всьому інтервалі інтерполяції $[x_0, x_n]$, що містить $n + 1$ вузлів, будують один поліном ступеня n . Якщо сигнал складний, то інтервал інтерполяції $[x_0, x_n]$ розбивають на менші відрізки, що містять два або більше вузлів, і на кожному з відрізків будують свій (локальний) інтерполяційний поліном відповідного ступеня [86].

Істотним недоліком кусочної інтерполяції є те, що в точках стику різних інтерполяційних поліномів виявляється розірваною їх перша похідна (функція має розрив). Цей недолік усувається при використанні інтерполяції сплайнами [86].

Такі методи апроксимації функцій передбачають точний збіг значень апроксимуючої і заданої функцій в певних точках – вузлах інтерполяції. У

деяких випадках такий спосіб побудови апроксимуючої функції виявляється абсолютно недоцільним. Наприклад, якщо мова йде про обробку експериментальних даних, отриманих в результаті спостережень або вимірювань. Справа в тому, що експериментальні дані завжди містять в собі помилки різного роду: систематичні, випадкові і грубі.

Систематичні помилки, як правило, дають відхилення в одну сторону від істинного значення вимірюваної величини. Вони можуть бути постійними або закономірно змінюватися при повторенні досліду. Їх причини і характер відомі. Систематичні помилки можуть бути викликані умовами експерименту, дефектом вимірювального приладу, невірним градуванням. Вони усуваються налагодженням апаратури або введенням відповідних поправок [86].

Випадкові помилки визначаються великим числом факторів, які не можуть бути усунені або в повній мірі враховані при вимірюванні та обробці результатів. Вони випадкові, несистематичні, дають відхилення від істинного значення в ту і іншу сторони при повторенні вимірювань. З ймовірнісної точки зору математичне очікування випадкової помилки дорівнює нулю [87]. Тому статистична обробка даних дозволяє визначити величину випадкової помилки і зменшити її шляхом багаторазового повторення вимірювань. Однак багаторазове повторення вимірювань не завжди доцільно, оскільки для цього можуть знадобитися великі матеріальні або людські ресурси. Значно дешевше і швидше можна отримати уточнені дані математичною обробкою результатів вимірювань.

Грубі помилки сильно спотворюють результат вимірювань і за величиною можуть значно перевищувати систематичні і випадкові помилки. Такі вимірювання відкидають і в подальшу обробку не включають.

Таким чином, експериментальні дані неминуче містять випадкові помилки. Як уже зазначалося, випадкова помилка може бути зменшена до якої завгодно малої величини шляхом проведення багаторазових вимірювань

[86]. Однак, більш ефективним способом позбавлення випадкових помилок є відповідна математична обробка результатів вимірювань.

Нехай величини x і y зв'язані між собою залежністю $y = \varphi(x)$; експериментальні точки відхиляються від цієї залежності внаслідок випадкових помилок. Відомо, що випадкові помилки вимірювання, як правило, підпорядковуються нормальному закону розподілу. Результатом вимірювання є значення випадкової величини Y_i , розподіленої також за нормальним законом з математичним очікуванням $\varphi(x_i)$ і з середньоквадратичним відхиленням σ_i , що характеризує величину помилки. Будемо вважати, що точність вимірювань у всіх точках однакова:

$$\sigma_0 = \sigma_1 = \dots = \sigma_n = \sigma.$$

Тоді густина щільності ймовірності запишеться у вигляді [86, 87]:

$$p_i(y_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[y_i - \varphi(x_i)]^2}{2\sigma^2}}.$$

В результаті вимірювань випадкові величини (Y_0, Y_1, \dots, Y_n) прийняли сукупність значень (y_0, y_1, \dots, y_n) . Підберемо математичні очікування $\varphi(x_0), \varphi(x_1), \dots, \varphi(x_n)$ так, щоб ймовірність цієї події була максимальна.

Строго кажучи, ймовірність будь-якої з подій $Y_i = y_i$ дорівнює нулю, тому що величини Y_i безперервні. Скористаємося не ймовірностями подій $Y_i = y_i$, а можливостями того, що величина Y_i прийме значення в інтервалі $[y_i, y_i + dy_i]$. Ймовірність такої події дорівнює добутку щільності ймовірності $p_i(y_i)$ на елемент dy_i [86, 87]:

$$P_i(y_i \leq Y_i \leq y_i + dy_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[y_i - \varphi(x_i)]^2}{2\sigma^2}} dy_i. \quad (3.28)$$

Тому що досліди незалежні, ймовірність того, що система випадкових величин (Y_0, Y_1, \dots, Y_n) прийме сукупність значень в інтервалах $[y_i, y_i + dy_i]$

буде дорівнює добутку ймовірностей (3.28) для всіх значень i [86, 87].

$$P = \prod_{i=0}^n P(y_i \leq Y_i \leq y_i + dy_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=0}^n [y_i - \varphi(x_i)]^2} \prod_{i=0}^n dy_i .$$

Для того, щоб ця ймовірність була максимальна, необхідно, щоб показник степеня в (3.28) був би мінімальним. Для того, щоб сукупність виміряних значень (y_0, y_1, \dots, y_n) мала найбільшу ймовірність, потрібно вибрати функцію $\varphi(x)$, так, щоб сума квадратів відхилень виміряних значень y_i від $\varphi(x_i)$ була мінімальною: $\sum_{i=0}^n [y_i - \varphi(x_i)]^2 \rightarrow \min$.

Всі ці методи достатньо вивчені та реалізуються в сучасних математичних системах, таких як (Mathcad, MATLAB, Maple та інші). Вони дають можливість виконувати операції апроксимації практично для будь-яких задач обробки даних без відволікання на теоретичні особливості методів та їх реалізацію.

3.4.2. Пошук коренів стандартними методами Matlab

Для проведення аналізу металів в часовій області важливо точно знати точки переходу сигналу через нульовий рівень, його мінімальні та максимальні значення.

Для пошуку коренів функції скористаємося стандартним методом пакету Matlab і покажемо його можливості для вирішення поставленої задачі.

Для прикладу, на першій ділянці визначено поліном ступеня $n=6$, який апроксимує дискретні значення на рис. 3.9.

$$\begin{aligned} P_I(x) &= a_1^I + a_2^I x + a_3^I x^2 + a_4^I x^3 + a_5^I x^4 + a_6^I x^5 + a_7^I x^6 = \\ &= -2,736789505196347 \cdot 10^{-5} + 1,824844329574749 \cdot 10^{-3} \cdot x - \\ &- 0,04135468883812621 \cdot x^2 + 0,3657651088735747 \cdot x^3 - \\ &1,161814528086325 \cdot x^4 + 1,709377375918848 \cdot x^5 + \\ &+ 0,903306791777141 \cdot x^6 \end{aligned}$$

Як видно з рис. 3.9, крива переходить через нульовий рівень в точках (дійсні корені полінома): $\bar{x}_1 = 12,3$; $\bar{x}_2 = 23,2$

У середовищі Matlab знайдені корені цього полінома:

$$\bar{x}_1 = -1,427660473208311 ; \quad \bar{x}_2 = 0,0368029116621054 ;$$

$$\bar{x}_3 = 0,0431838328398604 ; \quad \bar{x}_4 = 0,08105909387906636 ;$$

$$\bar{x}_{5,6} = 0,1842527080086087 \pm 0,21031447719915121 i$$

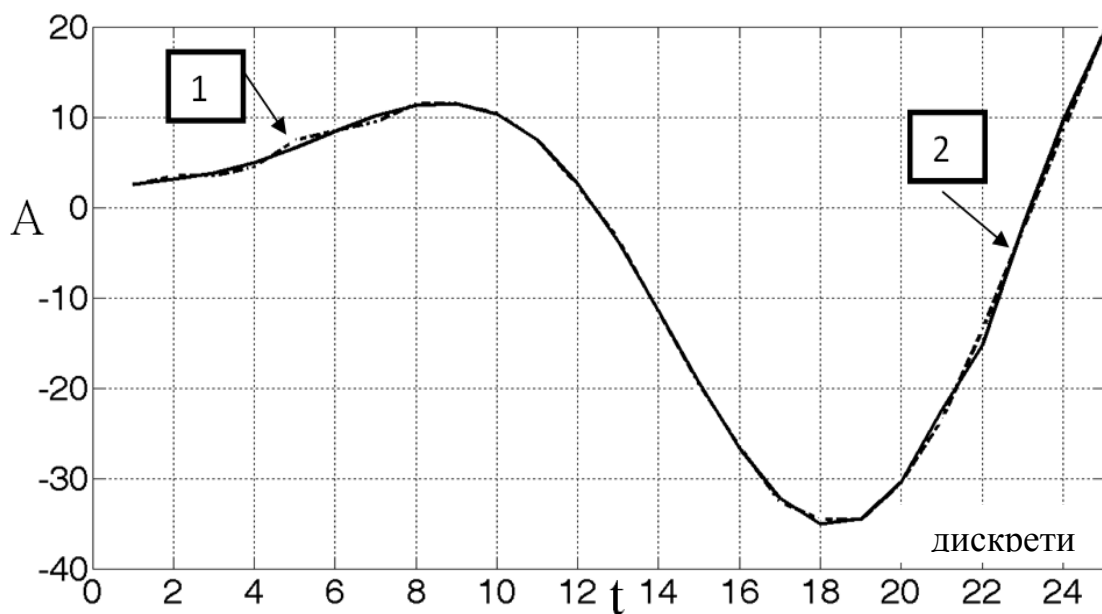


Рисунок 3.9 – Результати апроксимації сигналу (1 – апроксимована крива показана пунктирною лінією 2 – дискретні значення часового сигналу – суцільною лінією)

Вони не відповідають дійсності, тому що реальний поліном ступеня 6, побудований на експериментальних даних, виявляється складним для апроксимаційних програм Matlab [9]. Крім помилкових результатів, проведені обчислення визначають комплексно-спряжені корені полінома, які для дійсного часового сигналу не містять корисної інформації і засмічують інформаційне поле.

Як видно, розрахунок коренів стандартною програмою Roots Matlab дає комплексні корені. Даний результат є помилковим, тому корені потрібно знаходити іншим методом, скориставшись методом січних.

3.5. Аналіз впливу розмірів зразків металів на сигнал відгуку

Для експерименту використано зразки із міді та дюралюмінію наступних розмірів: а) пластина мідна 20x20x2мм, рис. 3.10; б) пластина мідна 20x40x2мм, рис. 3.11; в) пластина мідна 20x60x2мм, рис. 3.12; г) кутник дюралюміній 20x210x1,5мм, рис. 3.13; д) кутник дюралюміній 20x245x1,5мм, рис. 3.14.

При відсутності сигналу біля антен сигнал на виході приймальної “антени” мінімальний. Якщо у зону антен попадає метал, то він змінює баланс між “антенами” і на виході появляється сигнал. Діаметр приймальної “антени” 80мм, передавальної 160мм, приймальна “антена” знаходиться всередині передавальної, відстань між антенами $d=55$ мм.

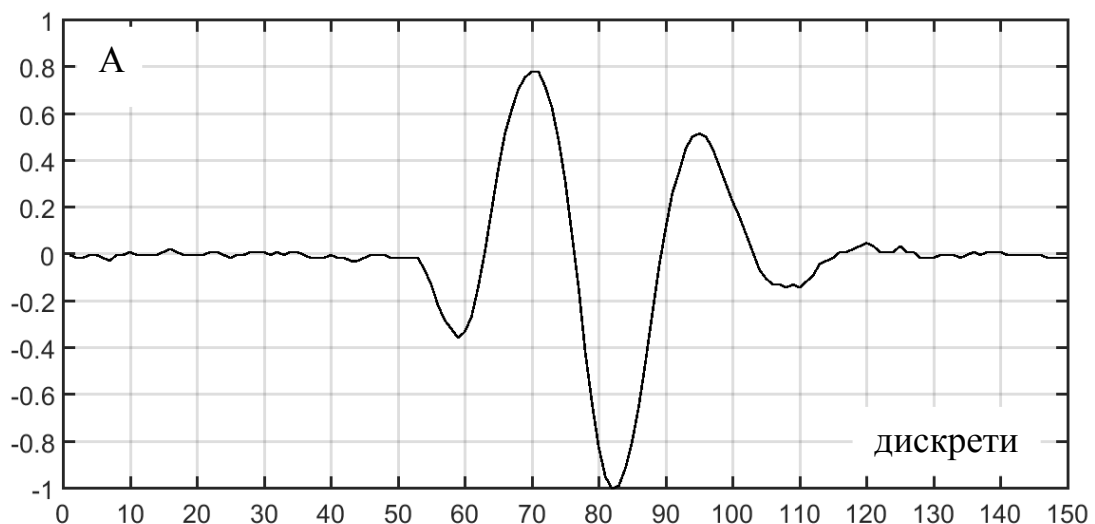


Рисунок 3.10 – Сигнал від пластини розміром 20x20x2 мм (тривалість 122-52 = 70 дискретів)

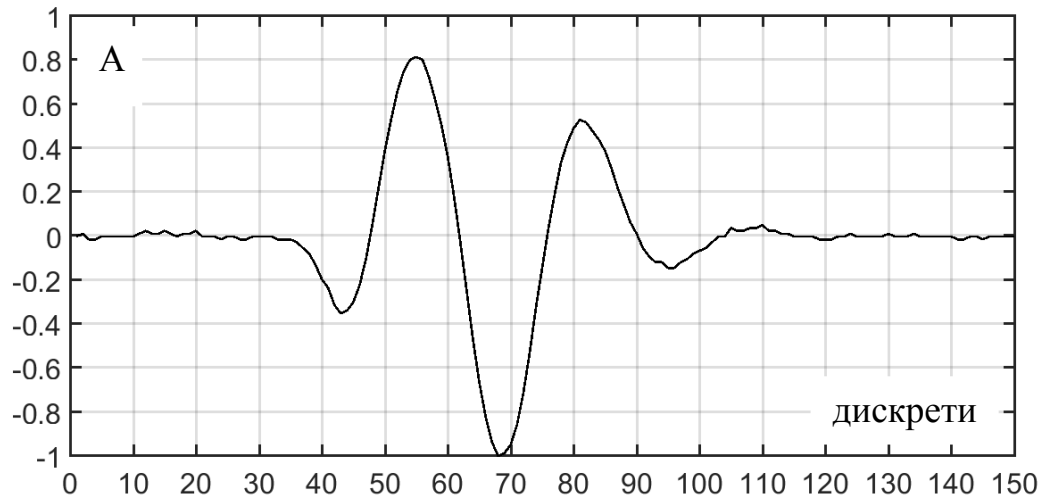


Рисунок 3.11 – Сигнал від пластини розміром 20x40x2 мм (тривалість 105-35 = 70 дискретів)

Тривалість відбитого сигналу від зразків, габарити яких менші “антени”, що показано на рис. а, б, в (70 дискретів). Якщо ж розміри зразка були більшими “антени”, то на виході появлялись два сигнали по формі схожі на сигнали від малих зразків, але рознесені у часі. Проведені вимірювання на зразках "г) – д)" показали, що при збільшенні лінійних розмірів зразка збільшується часове рознесення між сигналами.

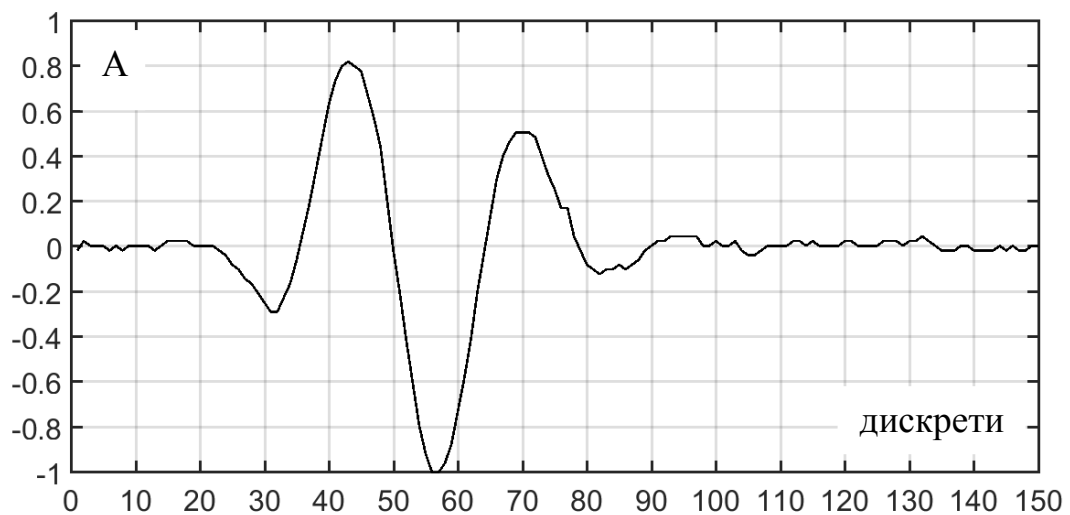


Рисунок 3.12 – Сигнал від пластини розміром 20x60x2 мм (тривалість 90-20 = 70 дискретів)

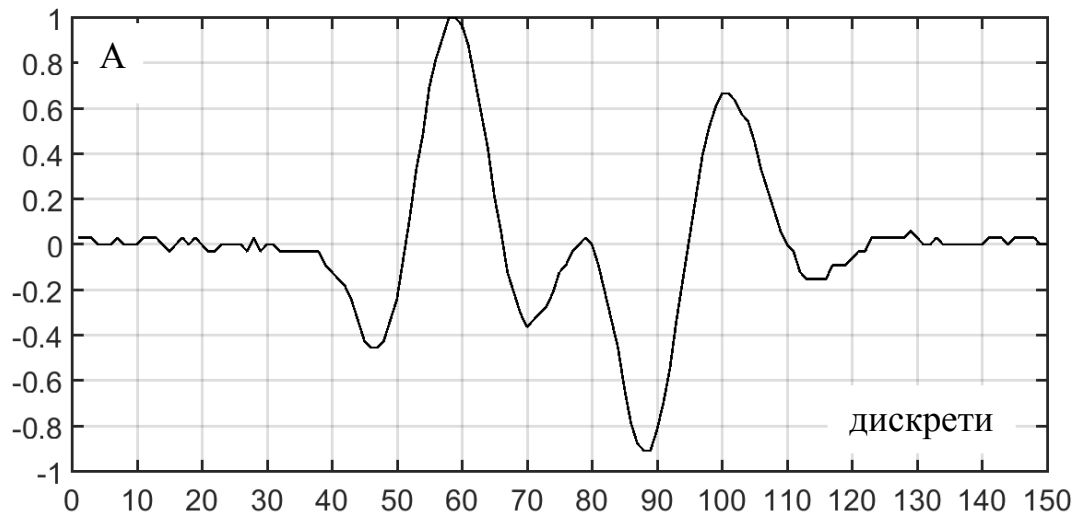


Рисунок 3.13 – Сигнал від кутника розміром 20x20x210 1,5мм (120-38 = 82 дискретів)

Встановлений ефект теоретично дозволяє на основі вимірювання часового рознесення визначати геометричні розміри металу. На рис. 3.13 – рис. 3.14 показано відбиті сигнали від кутників. На рисунку рис. 8.15 наведено сигнал від великого зразка. У сигналі вирізано відстань між вершинами, що в подальшому дозволяє сигнали від великих зразків обробляти такими ж методами, що і сигнали від малих (менше 80мм) зразків.

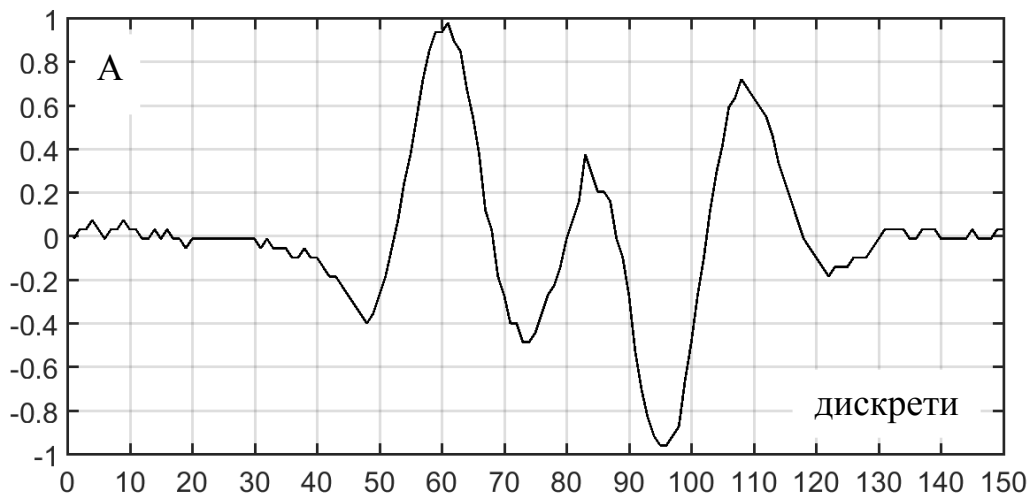


Рисунок 3.14 – Сигнал від кутника 15x15x240 1,5мм (130-40 = 90 дискретів)

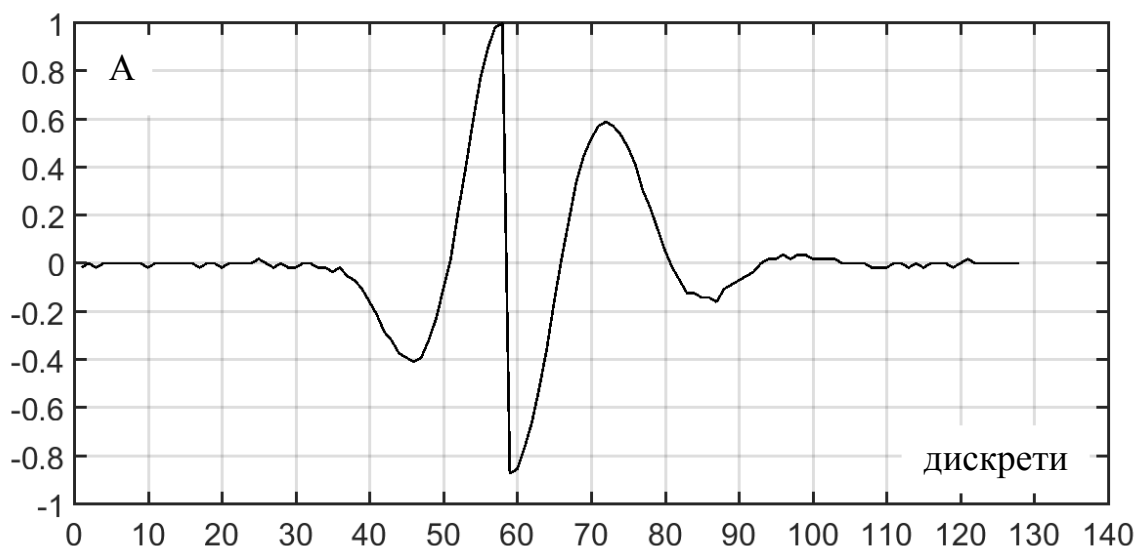


Рисунок 3.15 – Сигнал від великого зразка із вирізанням середини

Таким чином, якщо розміри зразка стають більшими за розмір “антенни”, то сигнал починає розтягуватись в часі, збільшується відстань між вершинами періодів. Для подальшої обробки цих сигналів, математичним пакетом “Матлаб” можна виділяти вершини періодів, вирізати проміжок між вершинами та з’єднувати їх. Отримані сигнали уже можна обробляти як і звичайні сигнали від малих зразків.

3.6. Ідентифікація апроксимуючої функції

Для вирішення задачі розпізнавання складу об’єктів проаналізуємо сигнали, які виникають при скануванні зразків, виготовлених з сталі 20 та міді електротехнічної (рис. 3.6).

Як видно з рис. 3.6, часові сигнали різних зразків мають різну форму і різну кількість екстремумів. У цих сигналах треба виділити характерні особливості, які можна об’єктивно порівнювати. Такими особливостями є положення нулів і екстремумів сигналу, які можна замінити характерними лініями. Тоді часовий сигнал перетвориться в іншу форму, зручну для порівняння.

Перетворення має відповідати таким критеріям.

1. Реальний час роботи системи.

Швидкодія техніки і виконання програми має узгоджуватися з фізичною роботою оператора та не створювати затримок.

2. Висока надійність програмного забезпечення.

Допускаються збої в роботі техніки, але в роботі програми виключаються аварійні зупинки, перезавантаження, зациклення і неоднозначні відповіді.

3. Точність роботи повинна відповідати класу приладу.

Технічні пристрої, що реалізують роботу програми, повинні укладатися в розміри і вагу приладу.

Вплив помилок вимірів, розкид геометричних розміром і форм вимірюваних зразків віднесені до проблеми ідентифікації та розглянуті в розділі експериментів.

Для перетворення часового сигналу в більш зручну форму необхідна його заміна швидкими апроксимаційними функціями. Складність розглянутих часових сигналів не дозволяє використовувати для їх повної апроксимації одну групу функцій і вимагає апроксимації окремих частин сигналу (кускової апроксимації). Використання стандартних методів кусково-лінійної, кусково-квадратичної, кусково-кубічної недоцільно через великі масиви обробки інформації. В даному випадку немає такої необхідності, тому без втрати даних вибір був зупинений на кусково-поліноміальній апроксимації.

Ступінь полінома апроксимації – фіксований ($n=10$), як показали експериментальні дослідження повторення форми полінома в 10 достатньо для повного перекриття фрагментів синалу. Кількість ділянок повної апроксимації змінюється в залежності від складності сигналів і точності апроксимації [88]. На кожній ділянці задаємо кількість дискретних точок

$x_{1,1}$, $x_{1,2}$, ..., $x_{1,m}$, отриманих в експерименті, і записуємо поліном апроксимації ділянки

$$P(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + \dots + a_{n-1}x^n. \quad (3.29)$$

Розрахунки полінома (3.29) в дискретних точках представимо у вигляді прямокутної матриці

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{1,1}^2 & \dots & x_{1,1}^n \\ 1 & x_{1,2} & x_{1,2}^2 & \dots & x_{1,2}^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{1,m} & x_{1,m}^2 & \dots & x_{1,m}^n \end{bmatrix}, \quad (3.30),$$

в якій кількість рядків значно перевищує кількості стовпців ($m \gg n$).

Введемо вектор F_0 чисельних значень полінома (3.29) в дискретних точках і вектор Z невідомих коефіцієнтів полінома (3.29)

$$F_0 = \begin{bmatrix} P(x_{1,1}) \\ P(x_{1,2}) \\ \vdots \\ P(x_{1,m}) \end{bmatrix}; \quad Z = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{bmatrix}. \quad (3.31)$$

Тоді з виразів (3.29) і (3.30) випливає система лінійних рівнянь в матричній формі:

$$A \cdot Z = F_0 \quad (3.32)$$

Система рівнянь (3.32) є перевизначена, і для її вирішення застосовуємо матричний алгоритм Гаусса [1]:

$$A^T \cdot A \cdot Z = A^T \cdot F_0, \quad (3.33)$$

де A^T - транспонована матриця (3.30). Матричне рівняння (3.33) має рішення [1]:

$$Z = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot F_0. \quad (3.34)$$

Для будь-яких дискретних точок матриця $A^T \cdot A$ залишається позитивно визначеною, що забезпечує єдність розв'язку (3.34) і мінімум квадратичної помилки апроксимації. Однак це не дає гарантій щодо точності рішення. Тому для повної надійності рішення (3.34) підставляється в вираз (3.32), і в разі прийнятної точності рівнянь (3.32) завдання вважається вирішеним. Для випадків істотних помилок в рівняннях (3.32) результати (3.34) ліквідуються,

зменшується розмір ділянки апроксимації і розрахунок за формулами (3.30) - (3.34) повторюється.

Після успішного розрахунку на всіх ділянках отримуємо вектори рішень

$$Z_I = \begin{bmatrix} a_1^I \\ a_2^I \\ \vdots \\ a_{n-1}^I \end{bmatrix}; \quad Z_{II} = \begin{bmatrix} a_1^{II} \\ a_2^{II} \\ \vdots \\ a_{n-1}^{II} \end{bmatrix}; \dots \quad (3.35)$$

Розрахунок за всіма векторами Z_I , Z_{II} , ... забезпечує збіг повної апроксимуючої кривої із заданою часовою кривою. На рис. 3.9 показаний розрахунок першого фрагмента Z_I сигналу – рис. 3.6. Розрахунок для всіх фрагментів сигналу можна представити у вигляді [1]:

$$Z = \sum_{i=1}^M Z_i,$$

де M – кількість фрагментів, на які розбивався сигнал.

На наступному етапі аналізуються аппроксимувальні поліноми ділянок

$$\begin{aligned} P_I(x) &= a_1^I + a_2^I x + a_3^I x^2 + \dots + a_{n-1}^I x^n; \\ P_{II}(x) &= a_1^{II} + a_2^{II} x + a_3^{II} x^2 + \dots + a_{n-1}^{II} x^n; \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3.36)$$

Кожен поліном перетинає дійсну вісь в декількох точках (корені, нулі) і має кілька екстремумів (мінімумів, максимумів), і всі ці характерні точки необхідно перетворити в характерні лінії.

Для пошуку коренів поліномів (3.36) існують стандартні програми. Однак експеримент показує, що поліном ступеня $n=10$ є складними для стандартних програм.

Але є ще більш важлива проблема – комплексно-спряжені корені полінома, які для дійсного часового сигналу не містять корисної інформації і засмічують інформаційне поле. Для усунення цих чинників передбачено сканування дискретних точок ділянки і вибір малих інтервалів, в яких

часовий сигнал змінює полярність. Виділені інтервали скорочуються методом січних до визначення коренів полінома з необхідною точністю.

Для виявлення екстремумів [33] ділянок розглядаються диференційовані поліноми (3.36)

$$\begin{aligned}\frac{dP_I(x)}{dx} &= a_2^I + 2a_3^I x + \dots + na_{n-2}^I x^{n-1}; \\ \frac{dP_{II}(x)}{dx} &= a_2^{II} + 2a_3^{II} x + \dots + na_{n-2}^{II} x^{n-1}; \\ &\vdots\end{aligned}\quad (3.37)$$

Для кожної ділянки знову вирішується завдання визначення коренів поліномів (3.37)

$$\frac{dP_I(x)}{dx} = 0 ; \quad \frac{dP_{II}(x)}{dx} = 0 ; \dots \quad (3.38)$$

Тепер корені поліномів (3.9) визначають розташування екстремумів на ділянці, а часовий сигнал – їх висоту.

Слід врахувати ще один заважаючий фактор. Ступені поліномів (3.38) менші ступенів поліномів (3.37), внаслідок чого на стику ділянок з'являються «мертві зони», в які можуть потрапляти екстремуми. Тоді при виборі ділянок треба передбачити їх перекриття.

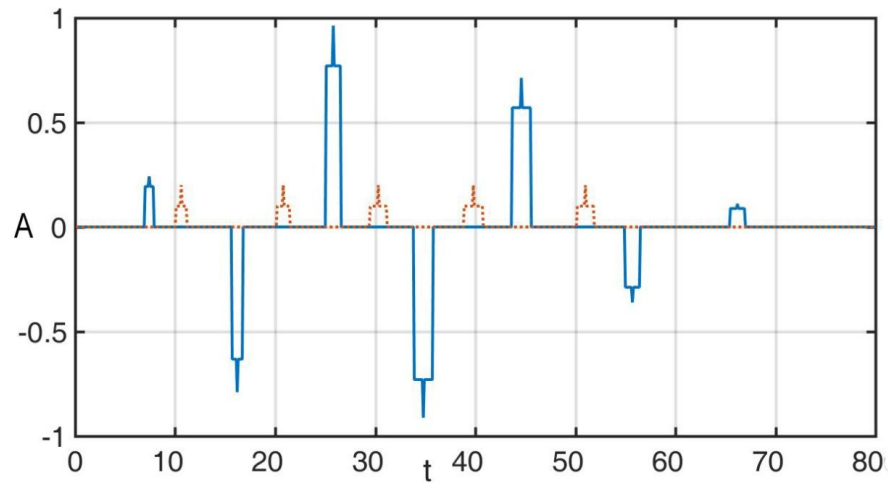
Аналізуючи етапи алгоритму в цілому, важливо відзначити, що чисельне рішення на кожній ділянці єдине і надійно контролюється за точністю.

В табл. 3.10 наведено характеристики графічних образів різних металів, що досліджувалися в даній роботі (база даних образів). Для кожного зразка в стовпцях 1,2,... наведено значення і координати послідовностей екстремумів, а також координати точок проходження сигналу через нульовий рівень. Як видно з табл. 6, кожен метал має різне розташування екстремумів і нульових точок, і тому за їх значеннями можна ідентифікувати тип металу, з якого виготовлено об'єкт. Для цього потрібно створити образ об'єкту з невідомого металу, розрахувати його коефіцієнти та порівняти його з тими, що вже є в базі даних, та знайти відповідний образ, тим самим визначивши тип металу.

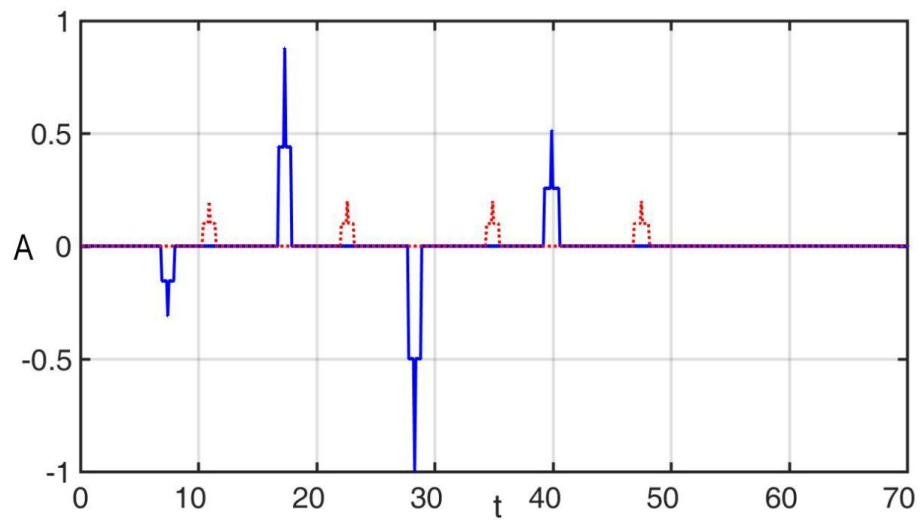
Таблиця 3.10 – Коефіцієнти графічно–цифрових образів для різних металів

| Параметр | № п/п екстремуму | | | | | | |
|------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| | Сталь 20 | | | | | | |
| Амплітуда | 0,305 | -0,947 | 0,946 | -0,900 | 0,982 | -0,532 | 0,184 |
| Координати екстремумів | 8 | 18 | 28 | 36 | 46 | 57 | 69 |
| Координати нулів | 12 | 23 | 32 | 41 | 52 | 65 | |
| | Мідь електротехнічна. | | | | | | |
| Амплітуда | -0,255 | 0,872 | -0,996 | 0,494 | -0,140 | | |
| Координати екстремумів | 7 | 18 | 29 | 41 | 52 | | |
| Координати нулів | 11 | 23 | 36 | 49 | | | |
| Координати екстремумів | 7 | 18 | 27 | 38 | 50 | 57 | 60 |
| Координати нулів | 11 | 22 | 34 | 46 | 56 | 58 | |

Графічно-цифровий образ сигналу [83] у часовій області для сталі 20 та електротехнічної міді наведено на рис. 3.16. Суцільною лінією показано мінімальні / максимальні значення, точками – переходи сигналу через нульовий рівень. Графічно-цифровий образ сигналі побудовано із урахуванням різних розмірів металевих предметів та різної їх орієнтації у просторі. "Голкою" позначено математичне очікування, а прямокутником середньо квадратичне відхилення.



а)



б)

Рисунок 3.16 – Часові діаграми сигналів після їх обробки чисельними методами (а – сталь 20, б – мідь електротехнічна)

Як видно із рис. 3.16 та числовим значенням коефіцієнтів із табл. 3.10 між часовими діаграмами для сталі і міді маємо чітко видимі відмінності. Сигнали мають різну кількість максимумів та різне їх положення.

3.7. Порівняння результатів, отриманих спектральним та часовим методами

Типові форми вхідних сигналів в часовій області від мідних та сталених зразків із мінімальними шумами показано на рис. 3.6, а їх спектри на рис. 3.17 – рис. 3.18. Випадок із зашумленими вхідними сигналами показано на рис. 3.19 та рис. 3.20 (часова область та спектральна) для рівня С/Ш 20дБ.

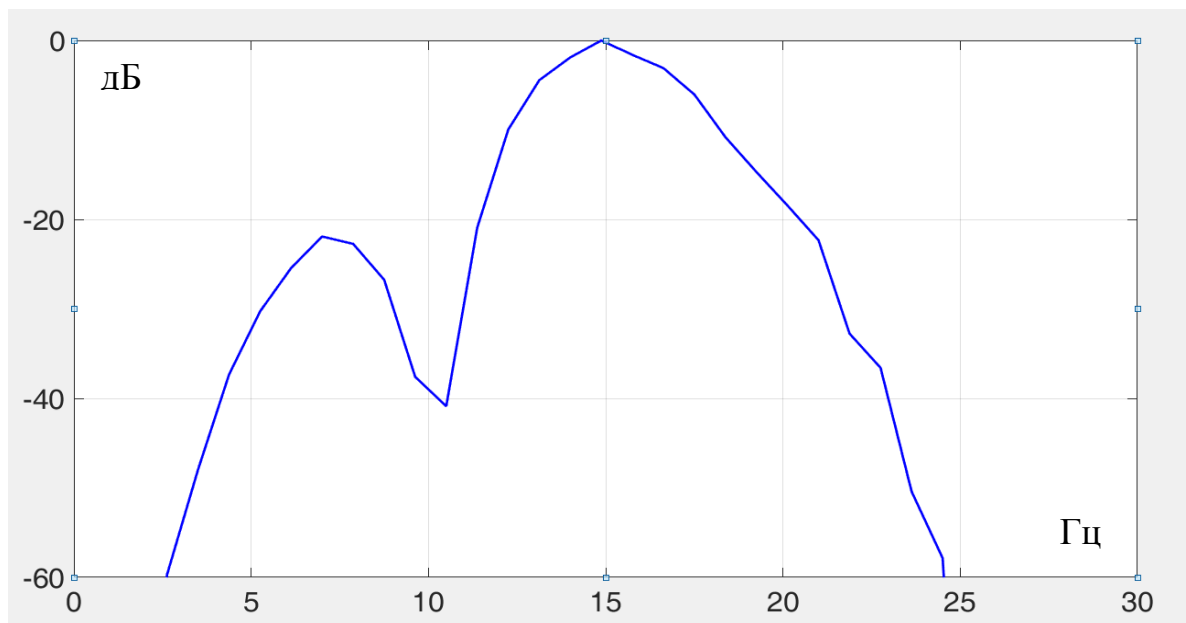


Рисунок 3.17 – Відбитий сигнал від сталеного зразка у спектральній області

З рис. 2.6, рис. 3.17 - 3.18 видно, що незашумлені сигнали в часовій та спектральній областях для різних металів різні.

Якщо ж сигнали зашумити (у середовищі Matlab задано співвідношення сигнал/шум 10дБ), то задача аналізу металів ускладнюється.

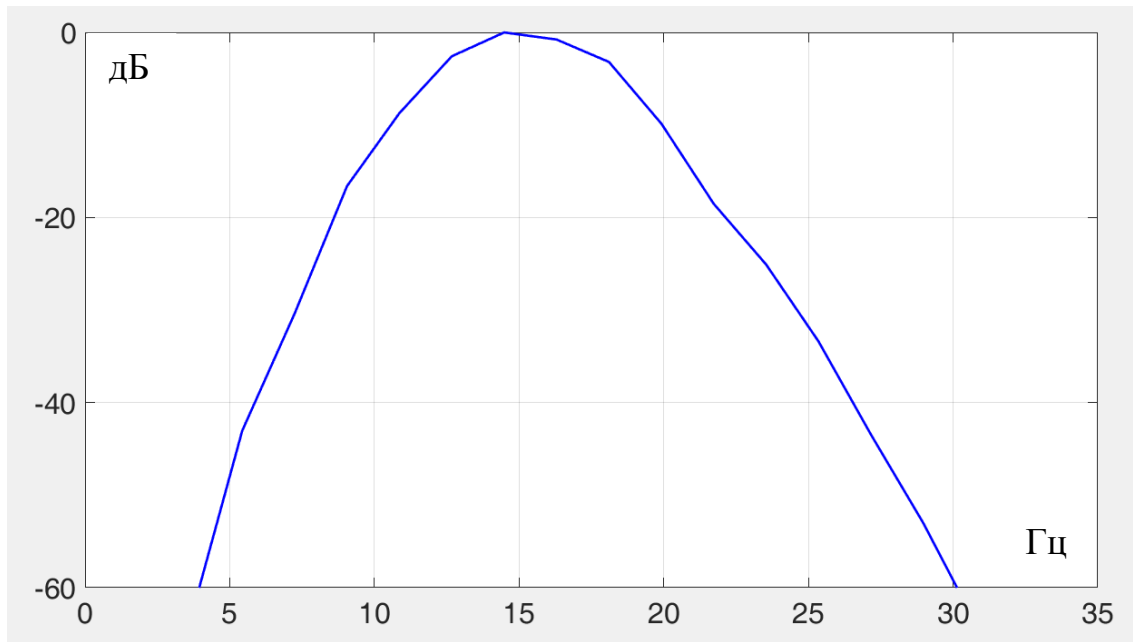


Рисунок 3.18 – Відбитий сигнал від мідного зразка у спектральній області

Однак по сигналах у часовій області видно, що зберігається основна інформативна ознака – знак та кількість максимумів в інформативній частині сигналу (рис.3.19).

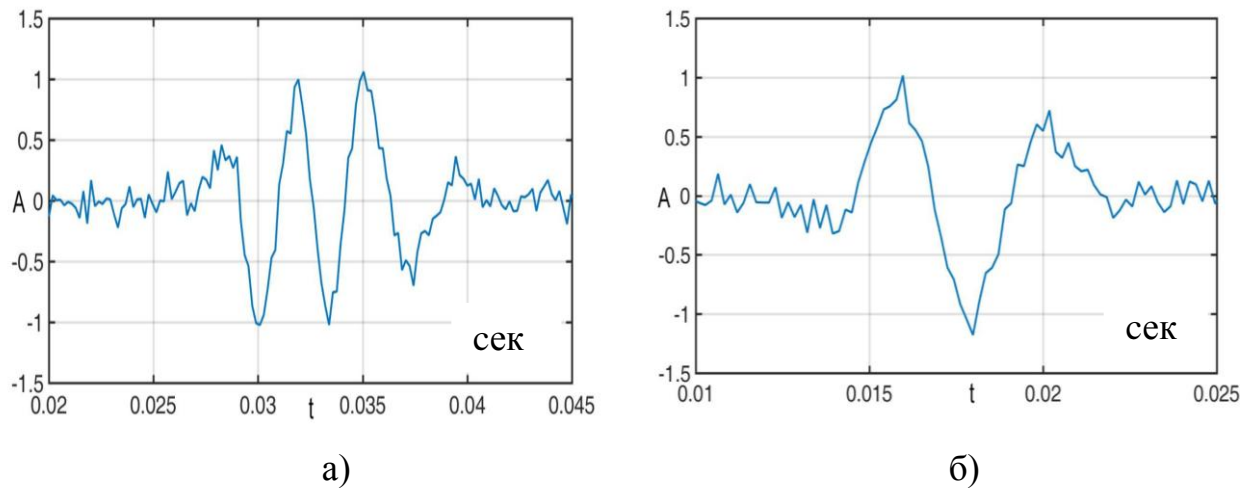
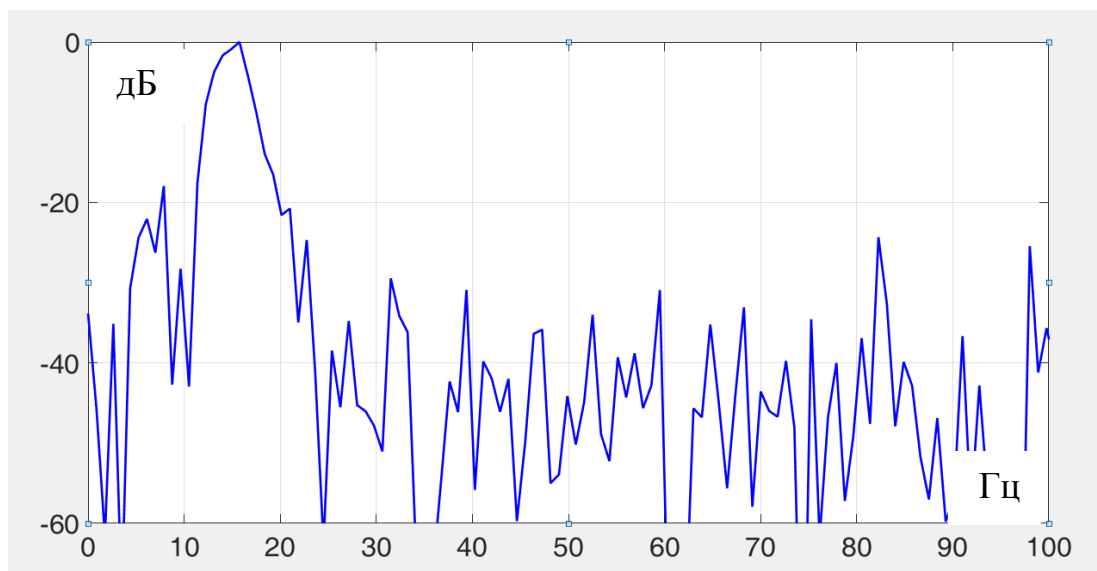
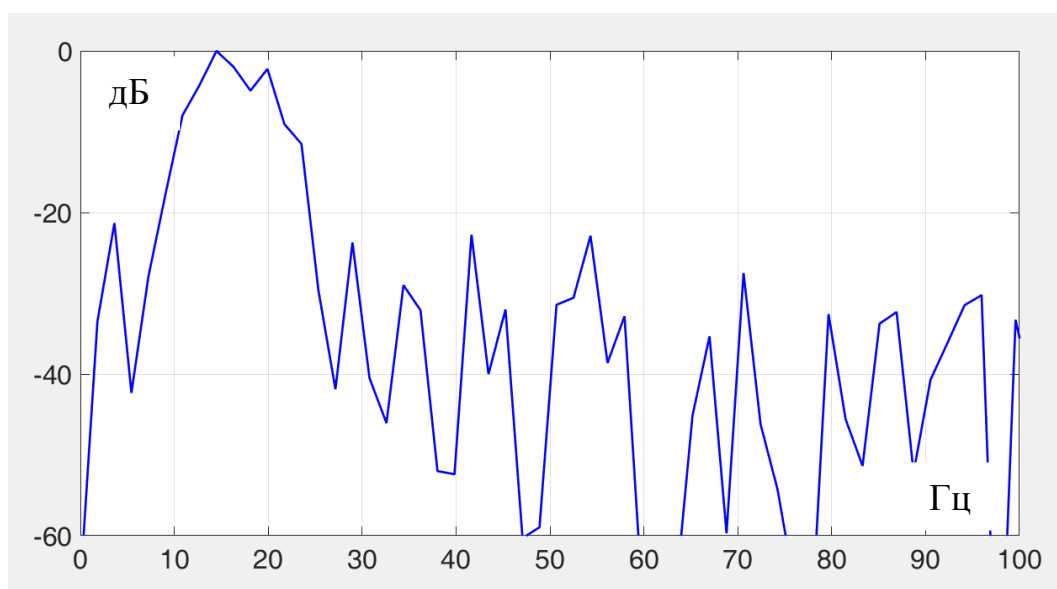


Рисунок 3.19 – Відбитий сигнал від сталюго (а) та мідного (внизу) зразків у часовій області. Сигнали зашумлені, співвідношення С/Ш 10 дБ

В спектральній ж області спектри обох сигналів стають подібними (рис.3.20).



а)



б)

Рисунок 3.20 – Відбитий сигнал від сталюого (а) та мідного (б) зразків у спектральній області. Сигнали зашумлені, співвідношення С/Ш 10 дБ

Таким чином, наглядно видно, що при зашумленні сигналів, форма спектрів змінюється, спектр міді на частотах 5 та 18 Гц має провали, чим став подібним до спектра сталюого зразка. В часовій ж області екстремуми сигналу залишились над рівнем шумів, а порівняння взаємного свіввідношення амплітуд є важливою умовою для обробки сигналів в часовій

області, щоб ідентифікувати тип металу. За таких умов є переваги методу графічно-цифрових образів над спектральним.

Оптимальним рішенням при визначенні типу металу є поєднання спектрального методу та методу графічно-цифрових образів, які доповнюють один одного.

Висновки до розділу 3

1. Проведено аналіз в результаті якого встановлено, що спектральний метод дозволяє ідентифікувати тип металу, якщо два предмети із різних металів знаходяться один від одного на відстані меншій половини діаметра приймальної "антени", менше 40 мм.

2. Проведений аналіз за коефіцієнтами лінійного передбачення показав, що використання базового алгоритму лінійного передбачення не забезпечує стабільного вірного розрізнення металевих зразків, які не приймали участі у створенні еталонної бази даних.

3. Використання нормування за тривалістю (часові зміни) при обробці сигналу дозволило поліпшити результати розпізнавання методом лінійного передбачення, що показало можливість та доцільність застосування спектрального аналізу до розрізнення металевих зразків за 2-ма групами за ознакою магнітний/немагнітний.

4. Розроблено метод часового аналізу сигналу, побудований на заміні сигналу графічно-цифровими образами, які дозволяють розрахувати різницю між металами по коефіцієнтах. В методі графічно-цифрових образів характерні лінії відрізняються координатами, висотою і полярністю та пов'язані з екстремумами сигналу та переходом його через нуль.

Запропонований метод дозволяє відбитий сигнал представити як діаграму із інформативних ознак, яка для різних металів є різною, а це

дозволяє провести ідентифікацію металу за результатами порівняння з попередньо записаними даними.

5. Показані переваги методу графічно-цифрових образів аналізу над спектральним, якщо сигнал зашумлений і співвідношення сигнал / шум менше 20дБ.

6. Показано, що для ефективної ідентифікації металів в підгрупах необхідно поєднати методи часового та спектрального аналізу. Розроблені методи аналізу сигналів розширили функціональні можливості вихрострумових приладів ідентифікації типу металів, щодо збільшення номенклатури металів які можна ідентифікувати.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ МЕТАЛІВ

Для дослідження можливостей аналізу металів в роботі використана експериментальна радіотехнічна система, яка була описана у попередніх розділах. Вона дозволила отримати вихідну інформацію (відбиті сигнали від дослідних зразків) про різні метали, з яких виготовлені ці зразки [1].

Розроблено методику проведення експериментів, яка у себе включає фіксацію основних параметрів дослідження (відстані від "антенної" системи до досліджуваних об'єктів, швидкості сканування) та параметрів нормування усіх відбитих сигналів, в результаті якого отримувалися зручні для порівняння форми сигналів. Для повторюваності експериментів використовувались зразки, виготовлені з різних металів, які мають однакові розміри та форму. Геометричне розміщення "антенної" системи та дослідного зразка встановлювалися однаковими для усіх експериментів. Це забезпечило повторюваність вимірів. Методика вимірювань детально описана у підрозділі 4.1. Всі результати обробки отриманих сигналів, магнітних (підрозділ 4.2) та немагнітних (підрозділ 4.3) металів зведено у таблиці (табл. 4.1 – 4.4). Табл. 4.1 містить результати аналізу металів спектральним методом, а табл. 4.2 – методом графічно-цифрових образів.

Отримані дані (див. підрозділ 4.4) дозволили порівняти між собою розроблені методи аналізу металів (див. підрозділ 4.5), а також зробити необхідні висновки.

4.1. Методика проведення експериментів

Всі експериментальні дані отримані на лабораторному макеті радіотехнічної системи, який був спеціально виготовлений для цієї мети. Його структурна схема показана на рис.1.8 (див. підрозділ 1). Основні технічні дані макету: носійна частота зондуючих імпульсів – 6,6 кГц,

потужність сигналу в передавальній "антені" – 1 Вт \pm 5%, розрахункова чутливість приймального тракту становить – 48 дБ.

Як індикаторний пристрій, що з'єднувався з виходом макету через USB-порт, використовувався ноутбук HP 4540s. На ПК для обробки сигналів встановлений пакет прикладних програм MATLAB. В його середовищі за допомогою програми нормування, вбудованого програмного пакету спектральних перетворень або розроблених програм для методу лінійного передбачення та графічних образів проводилися відповідні розрахунки.

В дослідах використовувалася "антенна" система, що складається з двох рамочних магнітних "антен", розміщених коаксіально в одній площині. Зовнішня "антена" випромінювала електромагнітне зондує поле, а внутрішня – приймала наведений сигнал [89, 90].

Характеристики "антен" та їх конструктивні параметри наведено в табл. 4.1. Переміщення "антенної" системи відносно дослідного зразка здійснювалося за допомогою спеціально розробленого пристрою, кінематична схема якого приведена на рис. 2.5.

Таблиця 4.1 – Конструктивні характеристики "антен"

| Характеристики | Передавальна | Приймальна |
|--|--------------|------------|
| Діаметр дроту, мм | 0,33 | 0,22 |
| Висота "антени" а, мм | 5 | 6 |
| Кількість витків w | 85 | 275 |
| Кількість шарів дроту n | 5 | 12 |
| Внутрішній діаметр рамки d _{пр} , d _{пер} мм | 162 | 81 |
| Індуктивність, мГн | 3,87 | 13,14 |

Характеристика дослідних зразків металів. Досліджувалися три зразки виготовлені в вигляді дисків з різних металів, один з яких чорний (сталь) та два кольорових (мідь і алюміній). Геометричні розміри зразків

наведені в табл.2.1. Примітка: в деяких дослідах використовувалися зразки виготовлені з інших матеріалів чи іншої форми. Це вказано в підписах під рисунками та в відповідних графах таблиць.

Результати усіх вимірювань в межах кожного із зразків усереднювались, для них розраховувалось математичне очікування та дисперсія.

4.1.1. Оцінювання потенційних можливостей вимірювального каналу системи

Похибка вимірювань амплітуди сигналу визначається точністю АЦП. У АЦП розрізняють такі типи похибок: похибка зсуву, похибка підсилення, інтегральна нелінійність, диференційна нелінійність та похибка квантування [9]. У роботі використано 10-бітний АЦП, що вмонтований у мікроконтролер AVR Atmega32, для цього АЦП мають місце наступні паспортні значення складових похибки: $\Delta = |\Delta_{OFF}| + |\Delta_{GAIN}| + |\Delta_{IntNL}| + |\Delta_{DifNL}| + |\Delta_{Quant}|$, де $|\Delta_{OFF}|$ – середньо-квадратичне відхилення (СКВ) зміщення, становить 0,5 LSB (LSB – least significant bit – молодший значимий біт); $|\Delta_{GAIN}|$ – СКВ підсилення, що дорівнює 1,5 LSB; $|\Delta_{IntNL}|$ – СКВ інтегральної нелінійності, вказано на рівні 0,5 LSB; $|\Delta_{DifNL}|$ – СКВ диференційної нелінійності, вказано на рівні 1 LSB; $|\Delta_{Quant}| = \frac{\Delta}{\sqrt{12}} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,29$ – СКВ похибки квантування, розраховане на рівні 0,29 LSB. Відносна похибка виміру δ обчислюється за наступною формулою: $\delta = \Delta \frac{1}{2 \cdot 2^n} \cdot 100\%$, де n – розрядність АЦП.

$$\delta = \Delta \frac{1}{2 \cdot 2^n} \cdot 100 = 3,79 \cdot \frac{1}{2 \cdot 2^{10}} \cdot 100 = 0,19\% .$$

Похибка SNR (signal to noise ratio) визначається як

$$SNR = \frac{V_{ref}}{nr} = 6,02 \cdot n + 1,76 = 61,96 [дБ] = 1253 [паз], \text{ де } V_{ref} - \text{ опорна}$$

напруга, nr – рівень шумів. Звідси $nr = \frac{2,56}{1253} = 2,04 \text{ мВ}$.

Зазначену похибку необхідно враховувати для визначення достовірності розрізнення металів в експериментах.

4.2. Результати досліджень сигналів системи при роботі із магнітними металами

Спектральні характеристики магнітних металів наведено у табл. 4.2 та на рис. 4.1, рис. 4.2., графічні образи – у табл. 4.3 та на рис. 4.3, рис. 4.4. Усі наведені дані знімалися при швидкості сканування 1500 мс. При цьому використані позначення: M_n , M_v – математичні очікування нижньої та верхньої частоти смуги сигналу, S_n , S_v – СКВ нижньої та верхньої частоти смуг сигналів, M , S – математичне очікування та СКВ площі спектру.

Таблиця 4.2 Спектральні характеристики магнітних металів

| Метал | Ширина спектра по рівню -40дБ (Гц) | Площа під обвідною спектру (дБ·Гц) |
|----------------|---|---------------------------------------|
| Сталь 20 | $M_n = 4,22$ $S_n = 0,12$ $M_v = 23,6$ $S_v = 0,25$ | $M = 427,91$ $S = 3,62$ |
| Нікель | $M_n = 9,21$ $S_n = 0,11$ $M_v = 27,57$ $S_v = 0,18$ | $M = 483,41$ $S = 4,50$ |
| Ніодім | Сигнал відсутній | Сигнал відсутній |
| Самаро-кобальт | Сигнал відсутній | Сигнал відсутній |
| Ферит | Сигнал відсутній | Сигнал відсутній |

Розраховане значення СКВ в табл. 4.2 велике, бо при зніманні сигналу рух "антенного" блоку над металевим зразком через особливості обертальної установки та розгойдування штанги кожен раз відбувався при різних швидкості та відстані.

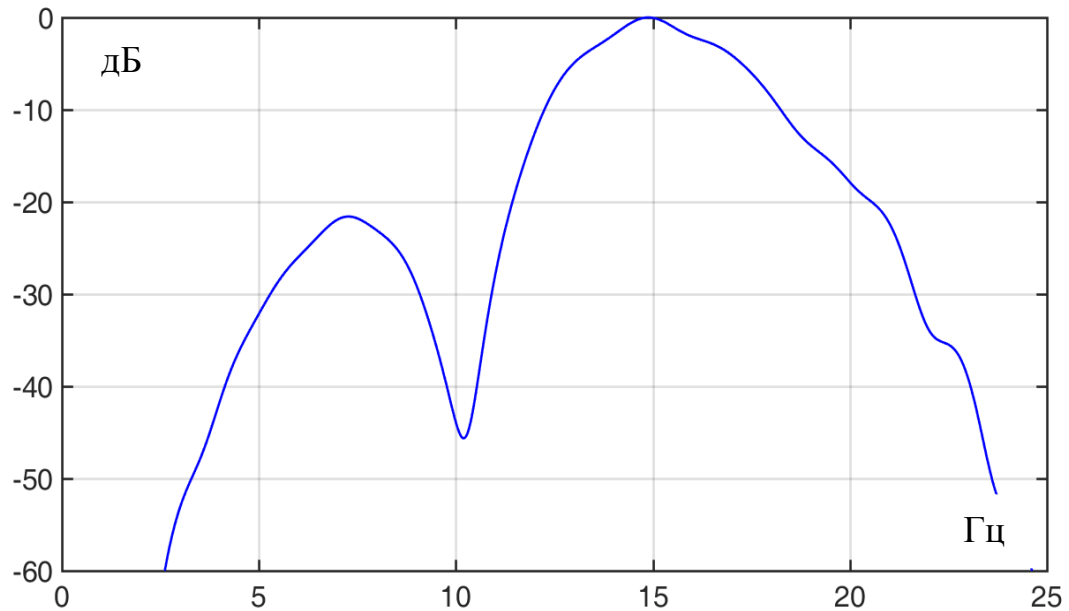


Рисунок 4.1 – Спектр відбитого сигналу отриманий від сталюого зразка

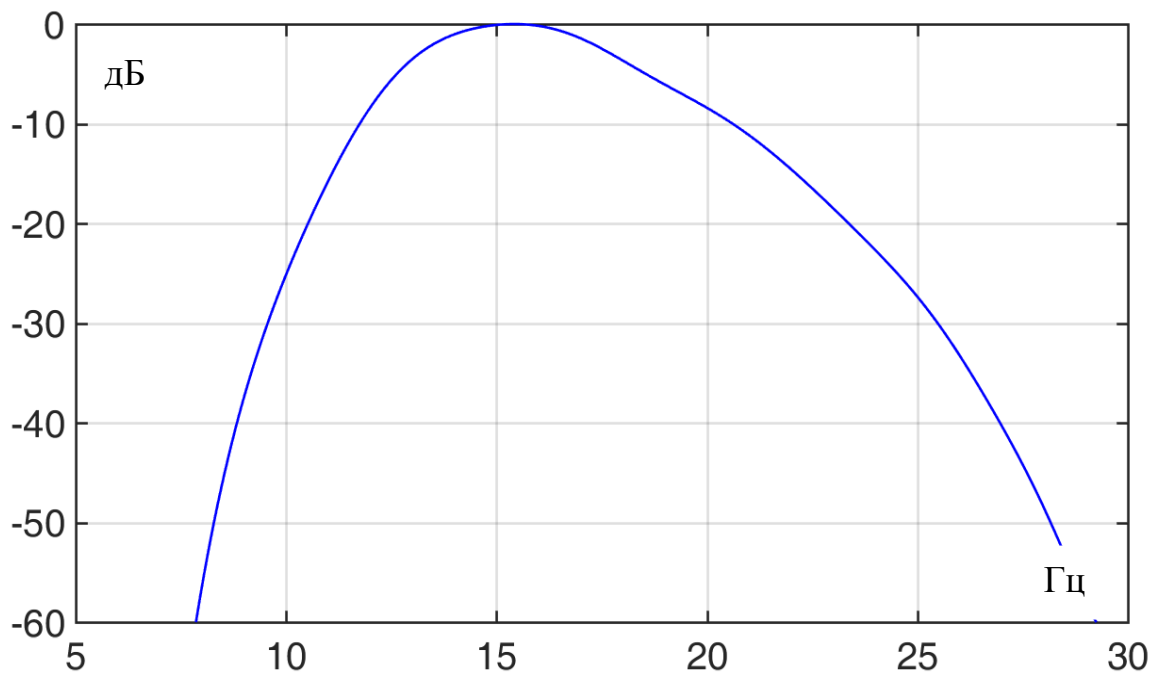


Рисунок 4.2 – Спектр відбитого сигналу отриманий від зразка із нікелю

Із рис. 4.1 та рис. 4.2 видно, що в спектрі від сталі на частоті приблизно 10,4 Гц є провал, який відсутній в спектрі нікеля.

Таблиця 4.3 – Коефіцієнти графічних образів для різних металів

| Параметр | №п/п екстремуму | | | | | | K% |
|------------------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| а | б | в | г | д | е | є | ж |
| | Сталь 20 | | | | | | |
| Амплітуда | M = | M = | M = | M = | M = | M = | M = |
| | 0,317 | -0,923 | 0,914 | -0,822 | 0,833 | -0,463 | 13,971 |
| | S = | S = | S = | S = | S = | S = | S = |
| | 0,024 | 0,057 | 0,074 | 0,095 | 0,069 | 0,097 | 0,951 |
| Координати екстремумів | M = | M = | M = | M = | M = | M = | |
| | 8,012 | 17,222 | 26,888 | 35,444 | 44,777 | 55,666 | |
| | S = | S = | S = | S = | S = | S = | |
| | 0,666 | 0,916 | 1,448 | 1,706 | 1,617 | 2,211 | |
| Координати нулів | M = | M = | M = | M = | M = | M = | |
| | 11,666 | 22,111 | 31,222 | 39,770 | 50,888 | 63,333 | |
| | S = | S = | S = | S = | S = | S = | |
| | 0,942 | 1,099 | 0,547 | 0,872 | 0,663 | 0,825 | |
| | Нікель | | | | | | |
| Амплітуда | M = | M = | M = | M = | M = | M = | M = |
| | 0,159 | -0,675 | 0,903 | -0,937 | 0,494 | -0,190 | 37,890 |
| | S = | S = | S = | S = | S = | S = | S = |
| | 0,037 | 0,083 | 0,072 | 0,059 | 0,073 | 0,031 | 0,391 |
| Координати екстремумів | M = | M = | M = | M = | M = | M = | |
| | 5,500 | 13,200 | 21,600 | 30,300 | 40,700 | 52,010 | |
| | S = | S = | S = | S = | S = | S = | |
| | 0,500 | 0,871 | 0,496 | 1,187 | 1,268 | 0,414 | |

Продовження таблиці 4.3

| а | б | в | г | д | е | є | ж |
|------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----|
| Координати нулів | М = 8,400 S = 0,663 | М = 16,900 S = 0,943 | М = 26,100 S = 1,220 | М = 36,200 S = 0,849 | М = 47,700 S = 0,345 | М = 58,900 S = 0,578 | |
| Ніодім | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| Самаро-кобальт | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| Ферит | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** |

** – сигнал відсутній, К% – параметр відсоткової різниці між двома найбільшими максимумами (для сигналів, подібних до сталі – беруться два від’ємні максимуми, а для сигналів, подібних до міді – беруться два позитивні найбільші максимуми). Розрахунок інформативного параметру К% здійснюється наступним чином: $A_1 > A_2$;

$$K = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \cdot 100\%.$$

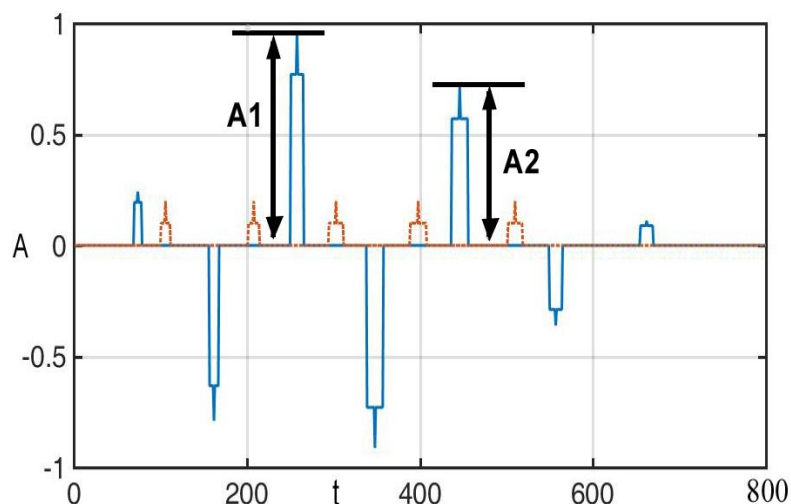


Рисунок 4.3 – Пояснення до розрахунку коефіцієнта К%

На рис. 4.5 та 4.6 для графічно-цифрових образів сталі та нікелю суцільною лінією позначено мінімальні / максимальні значення, а точками – координати переходу сигналу через нульовий рівень. Графіки побудовані для

математичних очікувань, із-за особливостей пакету Матлаб вони зображені не дельта функціями, а трикутниками.

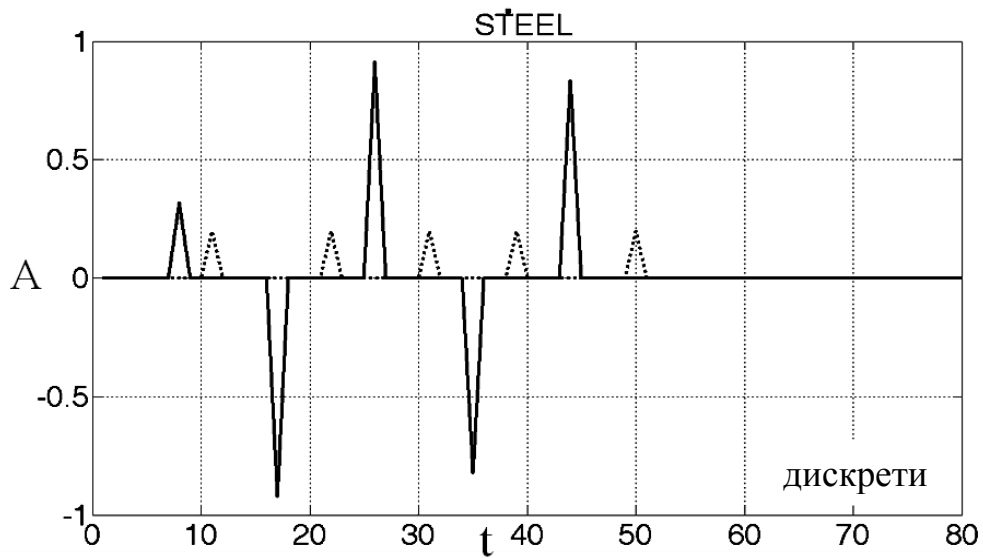


Рисунок 4.5 – Графічний образ сталі 20

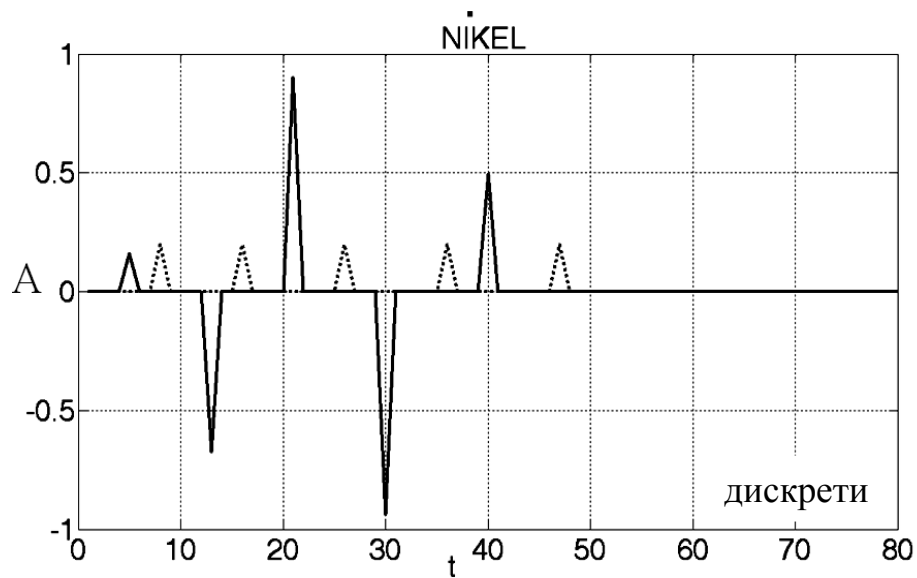


Рисунок 4.6 – Графічний образ нікелю

З вище наведених рисунків видно, що спектри сталі та нікелю різні, а їх графічні образи подібні. Причини різниці в спектрах буде пояснено у наступних підрозділах.

4.3. Результати досліджень сигналів системи при роботі із немагнітними металами

Спектральні характеристики кольорових металів наведено у табл. 4.4 та на рис. 4.7, рис. 5.11, графічні образи – у табл. 4.4 та на рис. 5.12, рис. 5.4.

В табл.4.5 приведені характеристики розрізнення металів спектральним методом та методом графічних образів.

Таблиця 4.4 – Спектральні характеристики кольорових металів (немагнітних)
(час сканування 1500 мс)

| Метал | Ширина спектру по рівню -40дБ (Гц) | Площа під обвідною спектру (дБ·Гц) |
|--------------------------------------|---|---------------------------------------|
| а | б | в |
| Мідь, електротехнічна | $M_H = 6,72$ $S_H = 0,09$ $M_B = 27,48$ $S_B = 0,16$ | $M = 575,91$ $S = 3,12$ |
| Срібло, 9999 проба | $M_H = 6,64$ $S_H = 0,10$ $M_B = 27,00$ $S_B = 0,14$ | $M = 544,36$ $S = 3,55$ |
| Срібло, 900 пр. 1 рубль 1896р. РІ | $M_H = 6,72$ $S_H = 0,11$ $M_B = 27,55$ $S_B = 0,29$ | $M = 556,36$ $S = 4,74$ |
| Срібло, 900 пр. 50 коп. 1912р. РІ | $M_H = 6,75$ $S_H = 0,09$ $M_B = 27,50$ $S_B = 0,17$ | $M = 552,81$ $S = 3,88$ |
| Титан | $M_H = 7,44$ $S_H = 0,29$ $M_B = 27,84$ $S_B = 0,36$ | $M = 537,66$ $S = 5,15$ |
| Золото, 900 проба | $M_H = 6,50$ $S_H = 0,15$ $M_B = 27,99$ $S_B = 0,32$ | $M = 545,08$ $S = 4,39$ |
| Сурма, маса 17 г | Сигнал відсутній | Сигнал відсутній |
| Свинець | $M_H = 7,23$ $S_H = 0,09$ $M_B = 28,62$ $S_B = 0,18$ | $M = 547,71$ $S = 4,49$ |
| Дюралюміній 10 | $M_H = 6,45$ $S_H = 0,11$ $M_B = 28,13$ $S_B = 0,22$ | $M = 551,3$ $S = 4,61$ |

Продовження таблиці 4.4

| а | б | в |
|--------------------------------|---|-----------------------------|
| Вісмут, самородок маса 77 г | $M_H = 4,89$ $S_H = 0,21$ $M_B = 28,46$ $S_B = 0,36$ | $M = 580,62$ $S = 10,81$ |
| Сталь та мідь разом | $M_H = 7,54$ $S_H = 0,29$ $M_B = 26,02$ $S_B = 0,32$ | $M = 493,42$ $S = 4,21$ |

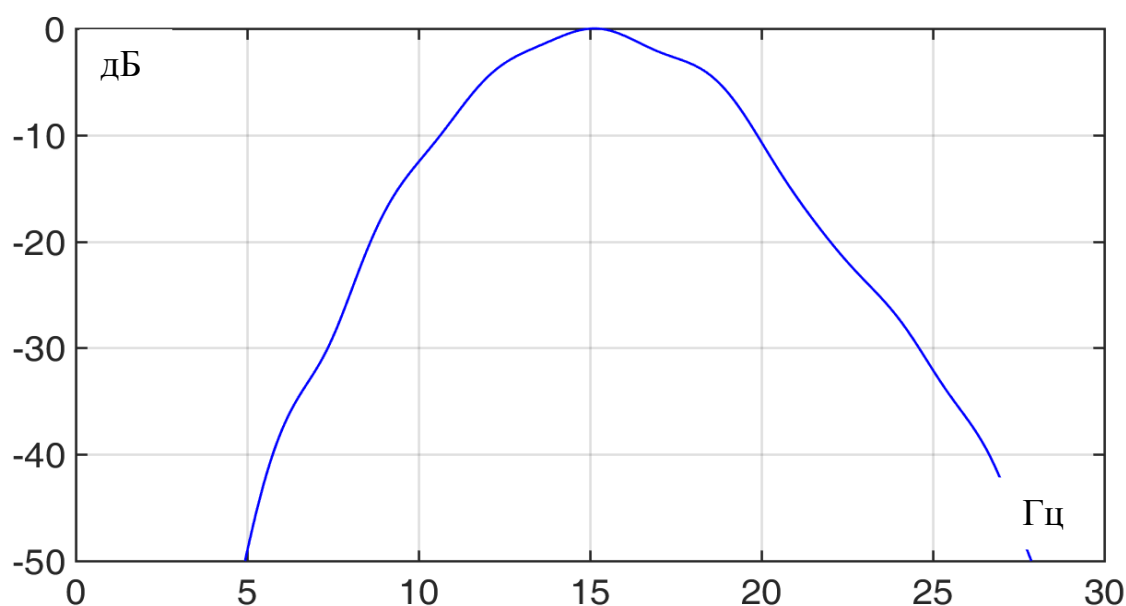


Рисунок 4.7 – Типовий спектр відбитого сигналу (матеріал зразка – мідь)

З рис. 4.7 (мідь) та рис. 4.8 (срібло) видно, що форма обвідної спектра та смуга у них подібна. При більш детальному порівнянні рисунків встановлено, що для міді крива при зростанні до максимального значення має форму подібна до параболи, а для срібла на частоті приблизно 9,8 Гц є невеликий перелом.

При спаданні кривої, для срібла на частотах, приблизно 20,8 Гц є прогин кривої та перелом на частоті, приблизно, 23,1 Гц. Для міді невеликий прогин кривої є на частоті, приблизно, 24,8 Гц. В подальшому, застосування різних методів аналізу форми кривої дозволить виділити інформативні ознаки у формі обвідної спектра.

Подібність кривих цих двох металів можна пояснити тим, що в періодичній системі елементів Менделєєва ці два метали знаходяться в одній групі з однаковою валентністю.

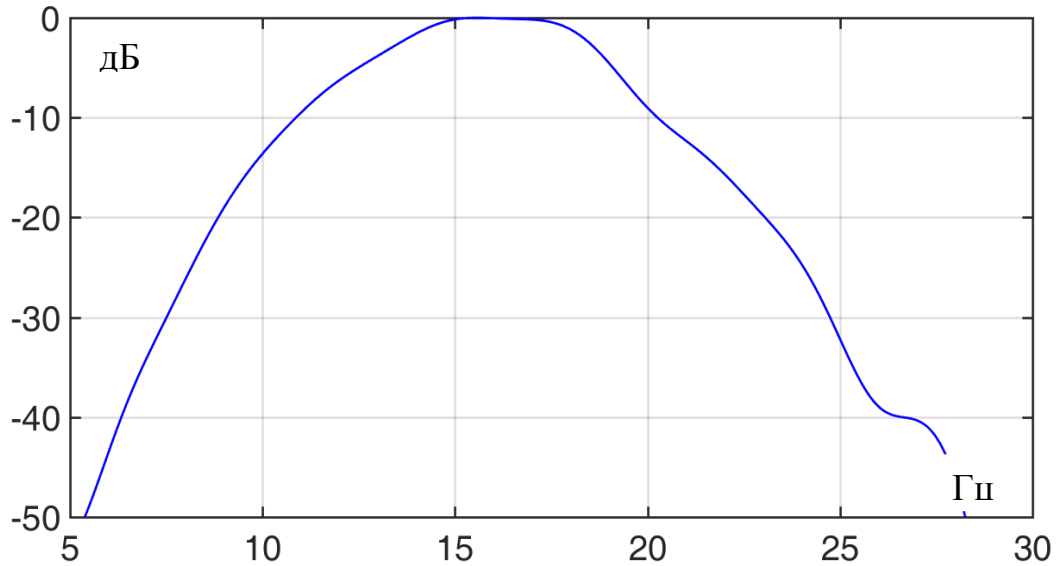


Рисунок 4.8 – Типовий спектр відбитого сигналу (матеріал зразка – срібло 868 проби)

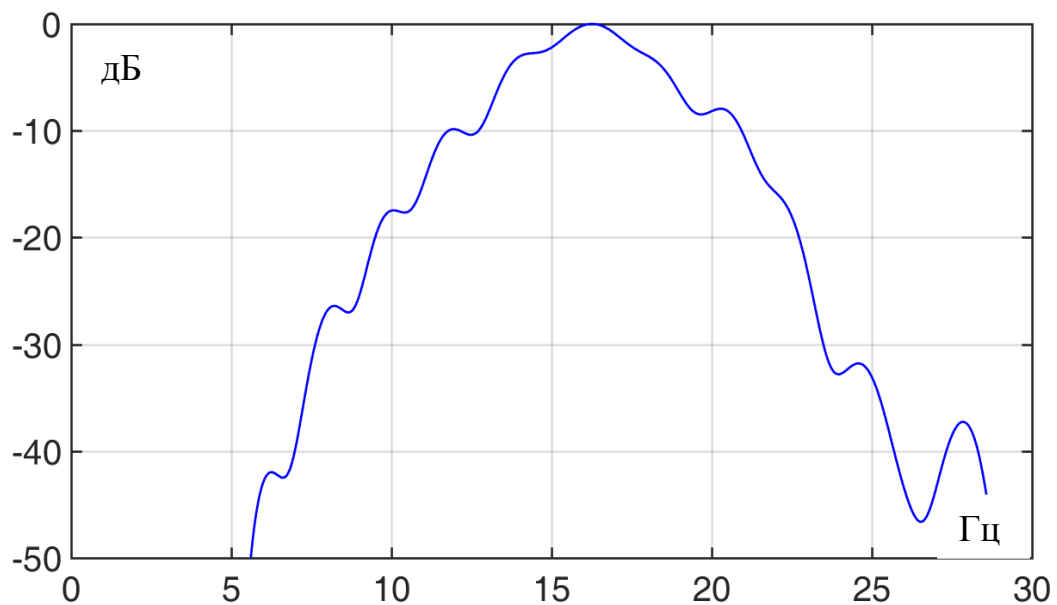


Рисунок 4.9 – Типовий спектр відбитого сигналу (матеріал зразка – титан)

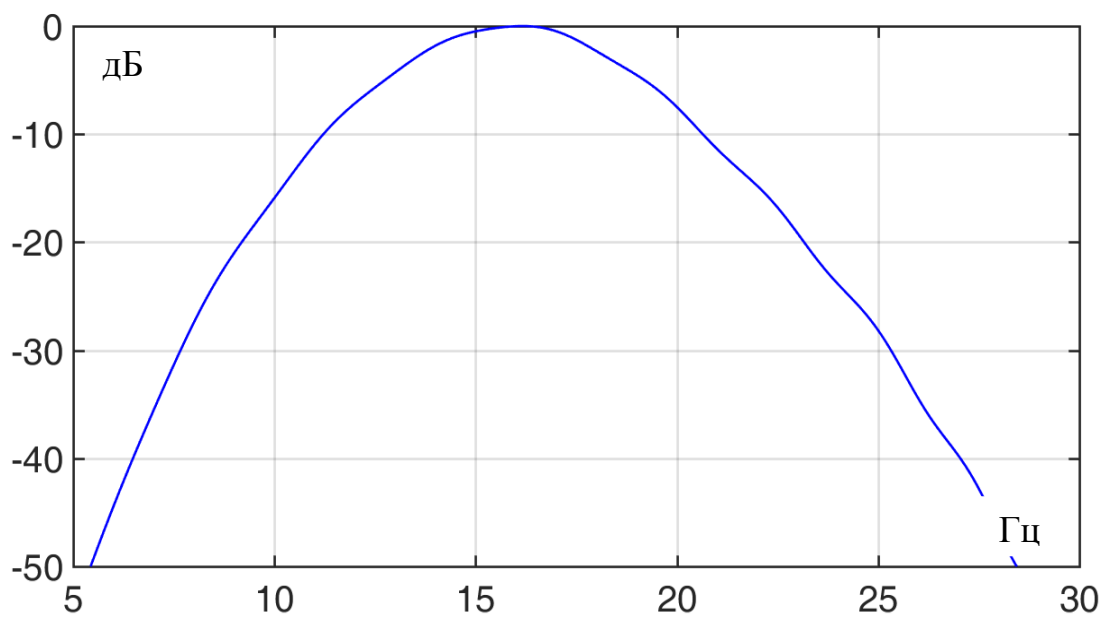


Рисунок 4.10 – Типовий спектр відбитого сигналу (матеріал зразка – золото 900 проба)

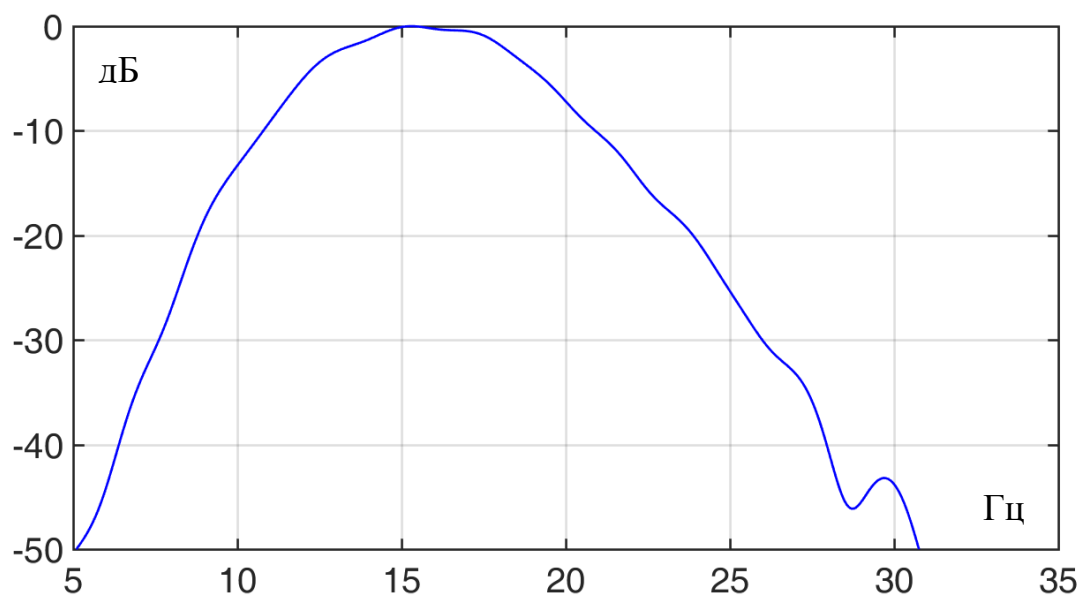


Рисунок 4.11 – Типовий спектр відбитого сигналу (матеріал зразка – свинець)

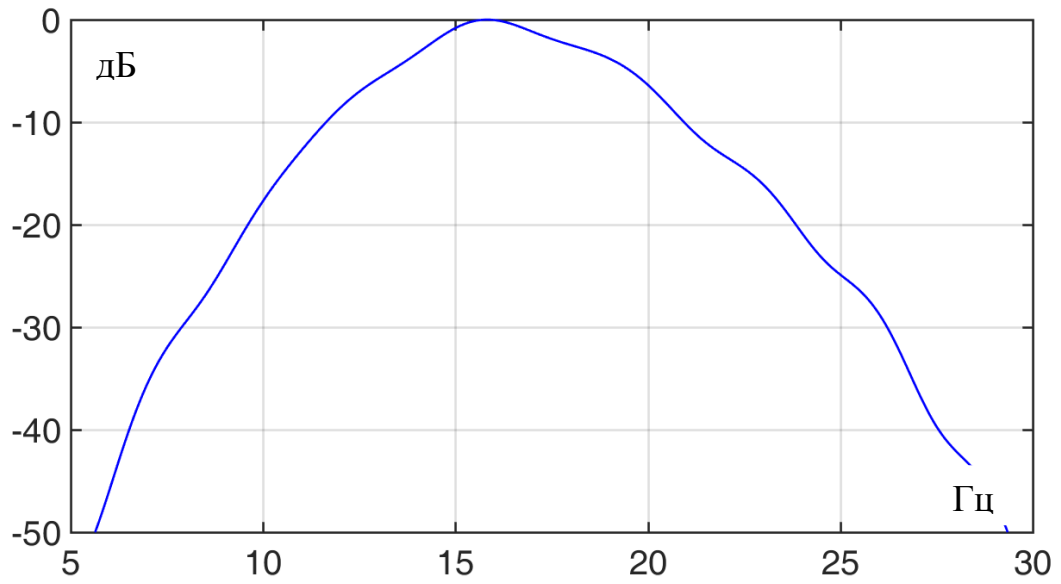


Рисунок 4.12 – Типовий спектр відбитого сигналу (матеріал зразка – дюралюміній 10)

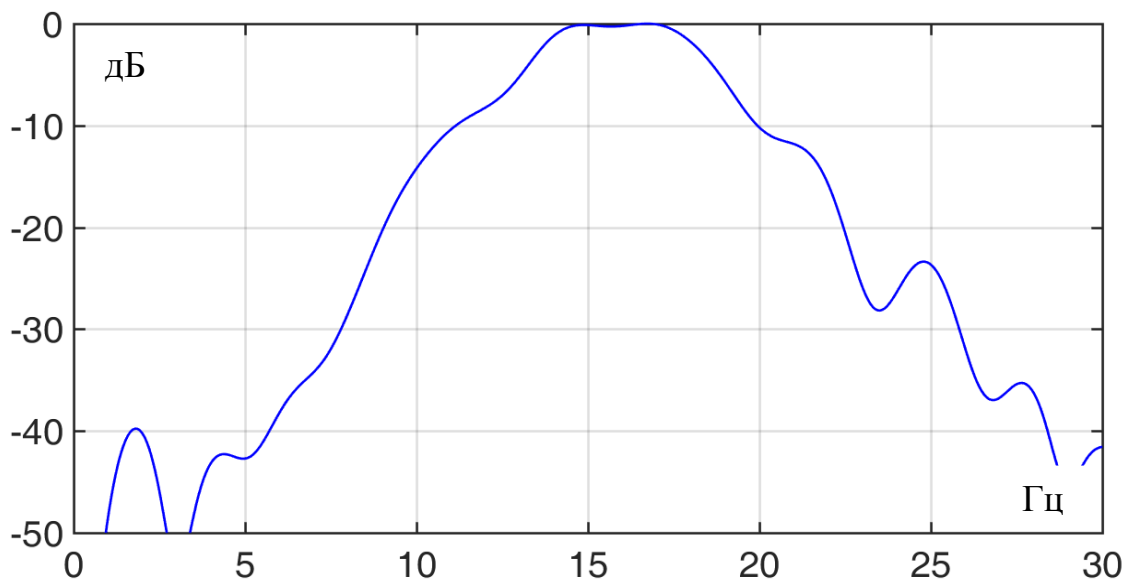


Рисунок 4.13 – Типовий спектр відбитого сигналу (матеріал зразка – вісмут)

Таблиця 4.5 – Графічні характеристики кольорових металів

| Параметр | №п/п екстремуму | | | | | | K% |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|-------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| а | б | в | г | д | е | є | ж |
| | Мідь електротехнічна | | | | | | |
| Амплітуда | M = -0,262 S = 0,016 | M = 0,880 S = 0,016 | M = -0,997 S = 0,004 | M = 0,491 S = 0,014 | M = -0,147 S = 0,011 | | M = 43,991 S = 0,351 |
| Коорд-ти екстремумів | M = 7,600 S = 0,489 | M = 17,900 S = 0,538 | M = 28,700 S = 0,640 | M = 40,200 S = 0,871 | M = 51,100 S = 0,830 | | |
| Коорд-ти нулів | M = 11,100 S = 0,538 | M = 22,800 S = 0,600 | M = 35,10 S = 0,830 | M = 47,500 S = 1,204 | | | |
| | Срібло 999,9 проба | | | | | | |
| Амплітуда | M = -0,264 S = 0,015 | M = 0,832 S = 0,017 | M = -0,982 S = 0,011 | M = 0,516 S = 0,015 | M = -0,153 S = 0,012 | | M = 41,791 S = 0,441 |
| Коорд-ти екстремумів | M = 7,880 S = 0,560 | M = 18,440 S = 0,830 | M = 29,440 S = 0,950 | M = 41,330 S = 0,810 | M = 52,110 S = 0,870 | | |
| Коорд-ти нулів | M = 11,220 S = 1,396 | M = 23,220 S = 2,042 | M = 35,550 S = 2,790 | M = 47,770 S = 2,570 | | | |

Продовження таблиці 4.5

| а | б | в | г | д | е | є | ж |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|-------------------------------|
| | Титан | | | | | | |
| Амплітуда | M = 0,449 S = 0,035 | M = -0,906 S = 0,020 | M = 0,993 S = 0,009 | M = -0,523 S = 0,0240 | | | M = 51,101 S = 0,671 |
| Коорд-ти екстремумів | M = 4,870 S = 0,780 | M = 13,620 S = 0,850 | M = 24,500 S = 0,860 | M = 34,120 S = 0,780 | | | |
| Коорд-ти нулів | M = 0,375 S = 0,484 | M = 7,870 S = 0,780 | M = 19,012 S = 0,866 | | | | |
| | Золото 900пр | | | | | | |
| Амплітуда | M = -0,272 S = 0,043 | M = 0,880 S = 0,062 | M = -0,984 S = 0,015 | M = 0,499 S = 0,011 | M = -0,155 S = 0,006 | | M = 43,229 S = 0,321 |
| Координати екстремумів | M = 7,333 S = 0,942 | M = 17,440 S = 1,422 | M = 28 S = 1,490 | M = 39,770 S = 1,47 | M = 51,440 S = 1,706 | | |
| Координати нулів | M = 11,110 S = 0,990 | M = 22,660 S = 1,030 | M = 34,660 S = 0,830 | M = 47,440 S = 0,490 | | | |

Продовження таблиці 4.5

| а | б | в | г | д | е | є | ж |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|-------------------------------|
| | Свинець | | | | | | |
| Амплітуда | М = -0,373 S = 0,029 | М = 0,966 S = 0,031 | М = -0,978 S = 0,013 | М = 0,481 S = 0,017 | М = -0,165 S = 0,022 | | М = 47,061 S = 0,430 |
| | | | | | | | |
| Координати екстремумів | М = 5,800 S = 0,979 | М = 14,400 S = 0,800 | М = 24,100 S = 1,300 | М = 34,800 S = 1,249 | М = 45,200 S = 0,770 | | |
| Координати нулів | М = 8,900 S = 0,943 | М = 19,200 S = 0,979 | М = 30,600 S = 1,280 | М = 42,300 S = 0,417 | | | |
| | Вісмут | | | | | | |
| Амплітуда | М = 0,228 S = 0,113 | М = -0,876 S = 0,080 | М = 0,993 S = 0,007 | М = -0,470 S = 0,038 | | | М = 46,267 S = 0,281 |
| Координати екстремумів | М = 6 S = 1,264 | М = 14,600 S = 1,200 | М = 24,800 S = 1,469 | М = 35,20 S = 1,326 | | | |
| Координати нулів | М = 8,800 S = 1,469 | М = 19,200 S = 1,326 | М = 30,800 S = 2,039 | | | | |

Продовження таблиці 4.5

| а | б | в | г | д | е | є | ж |
|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | Дюралюміній 10 | | | | | | |
| Амплітуда | M = -0,343 S = 0,019 | M = 0,958 S = 0,027 | M = -0,995 S = 0,005 | M = 0,485 S = 0,011 | M = -0,156 S = 0,015 | | M = 49,374 S = 0,390 |
| | | | | | | | |
| Координати екстремумів | M = 7 S = 0,894 | M = 16,500 S = 1,024 | M = 27 S = 0,774 | M = 38,300 S = 1,100 | M = 48,900 S = 1,044 | | |
| Коорд-ти нулів | M = 10,500 S = 0,922 | M = 21,400 S = 0,916 | M = 33,300 S = 0,900 | M = 45,300 S = 0,900 | | | |
| | Сталь 20 + Мідь електротехнічна | | | | | | |
| Амплітуда. | M = 0,105 S = 0,012 | M = -0,550 S = 0,005 | M = 1,000 S = 0,008 | M = -0,872 S = 0,010 | M = 0,408 S = 0,006 | M = -0.150 S = 0,003 | M = 59,202 S = 0,441 |
| Координати екстремумів | M = 7,015 S = 0,701 | M = 13,201 S = 0,615 | M = 22,108 S = 0,952 | M = 31,192 S = 0,702 | M = 40,122 S = 0,920 | M = 68,117 S = 0,840 | |
| Координати нулів | M = 9,011 S = 0,670 | M = 17,150 S = 0,707 | M = 26,054 S = 0,768 | M = 36,021 S = 0,806 | M = 45,034 S = 0,670 | | |

На рис. 4.20 показано графічно-цифрові образи від міді та алюмінію, а на рис. 4.21 графічно-цифрові образи міді та нікелю. Зеленим кольором на обох рисунках зображено образ міді, а синім іншого металу.

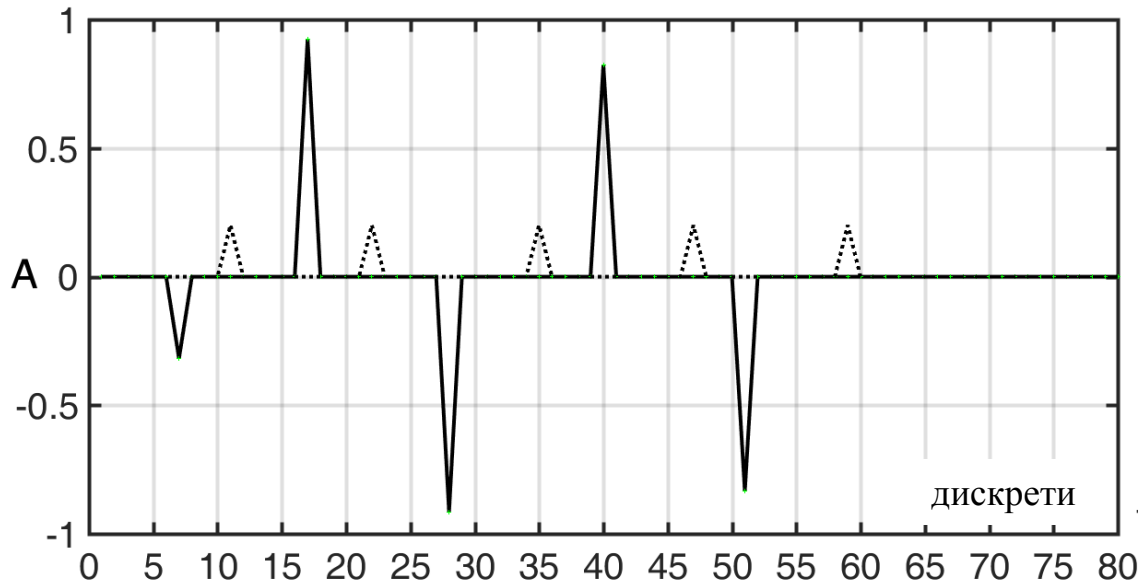


Рисунок 4.13 – Графічний образ (матеріал – мідь електротехнічна)

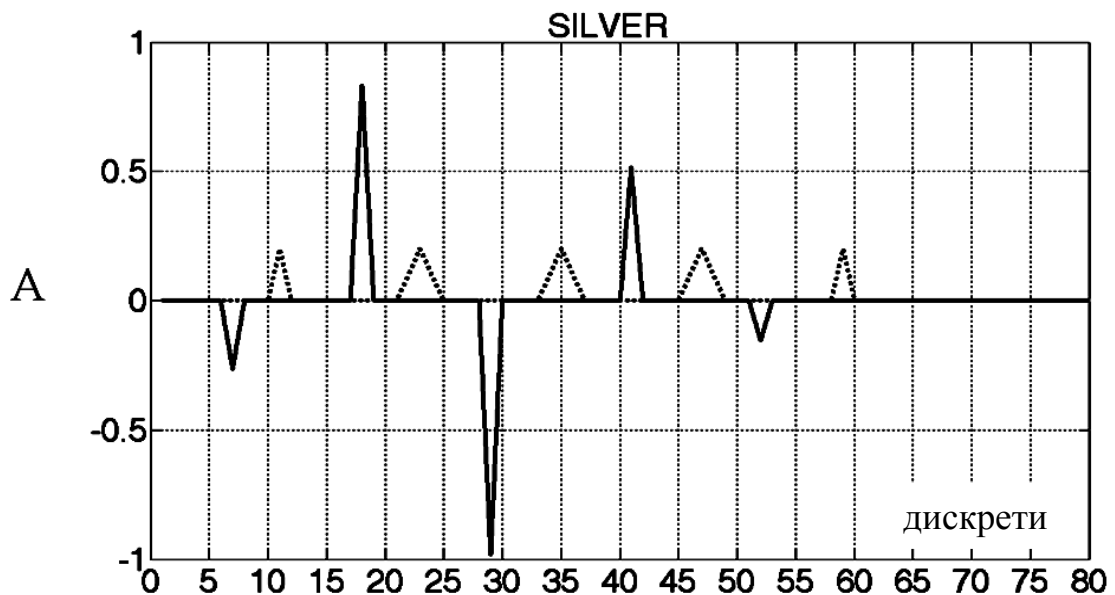


Рисунок 4.14 – Графічний образ (матеріал – срібло 868 проба)

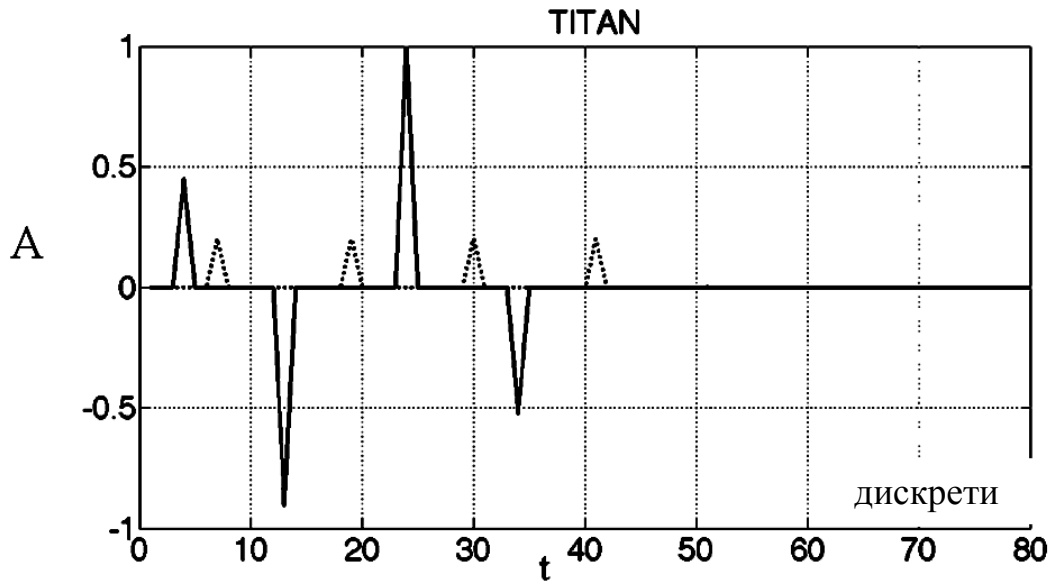


Рисунок 4.15 – Графічний образ (матеріал – титан)

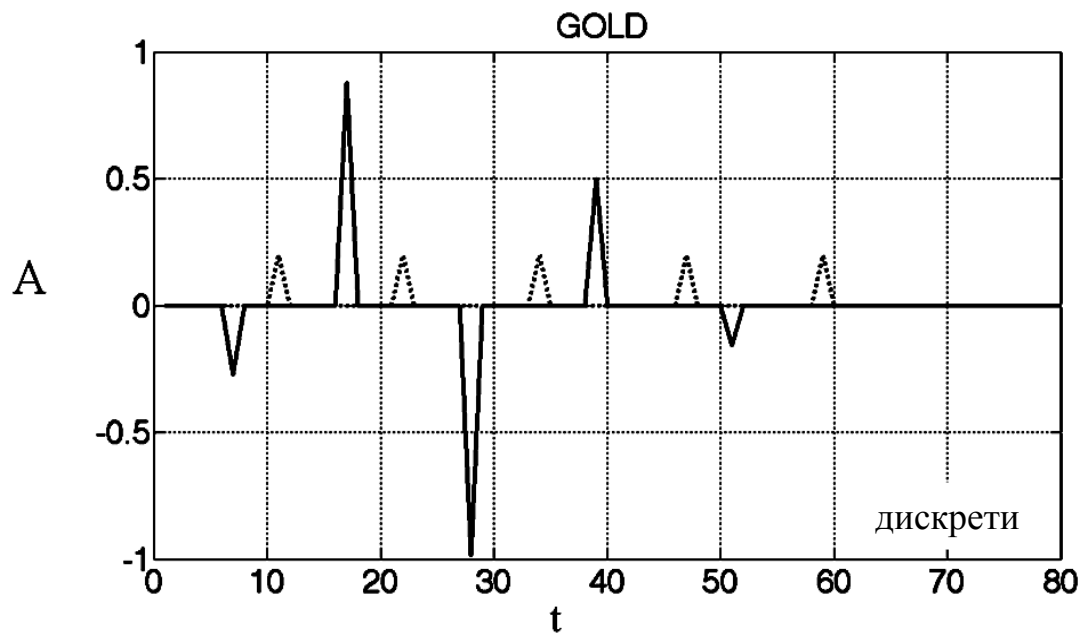


Рисунок 4.16 – Графічний образ (матеріал – золото 900 проба)

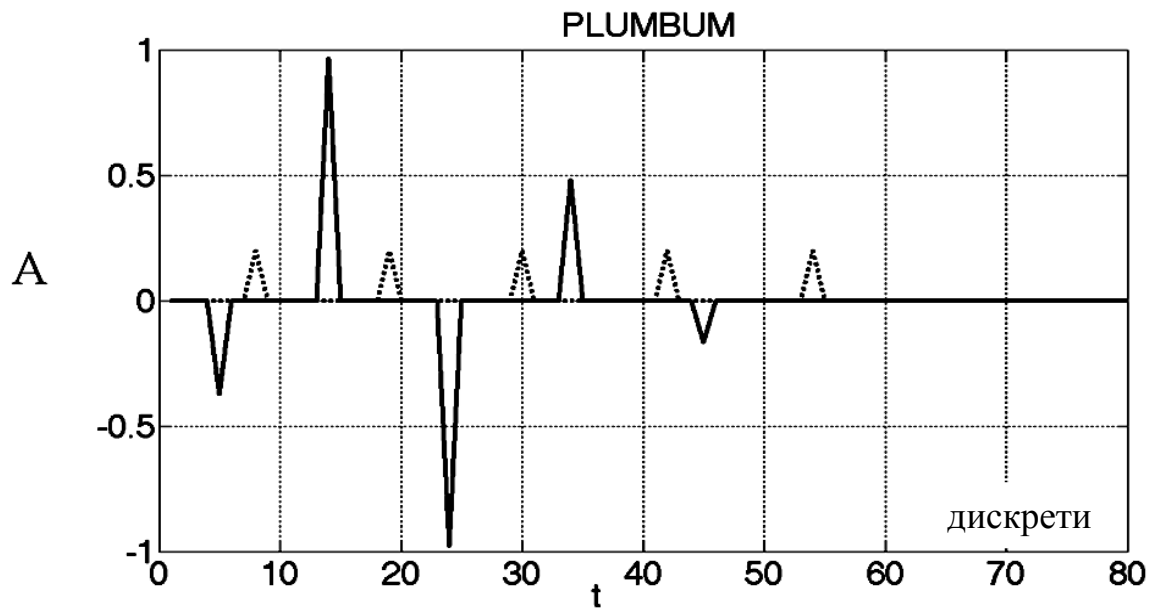


Рисунок 4.17 – Графічний образ (матеріал – свинець)

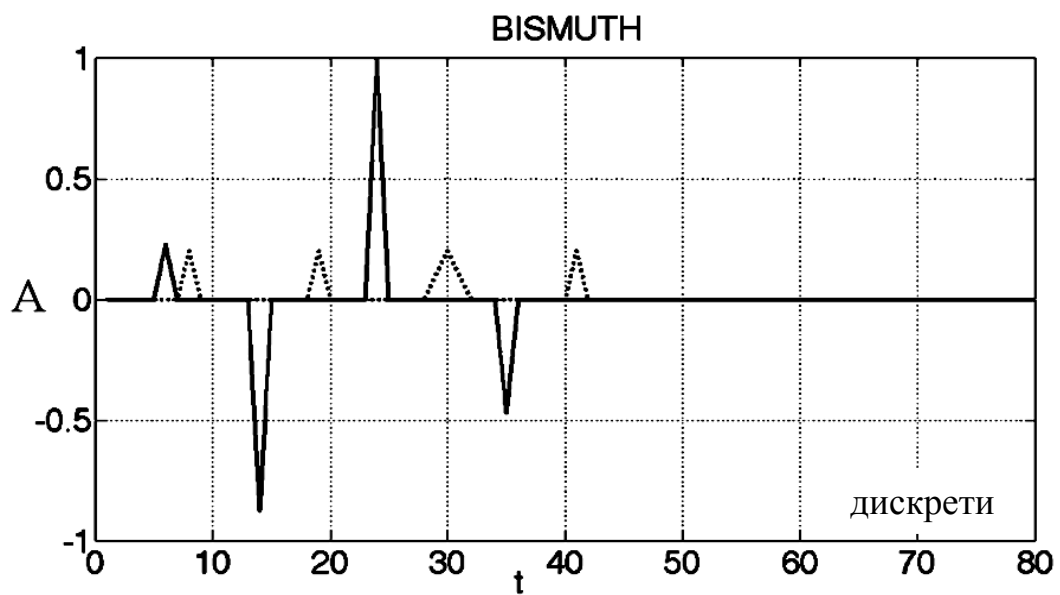


Рисунок 4.18 – Графічний образ (матеріал – вісмут)

Графічно-цифровий образ сталі та міді (рис. 4.19) відрізняється від образів поокремих металів. Різниця заключається в різному значенні $K\%$, що можна використати для розрізнення цих образів між собою.

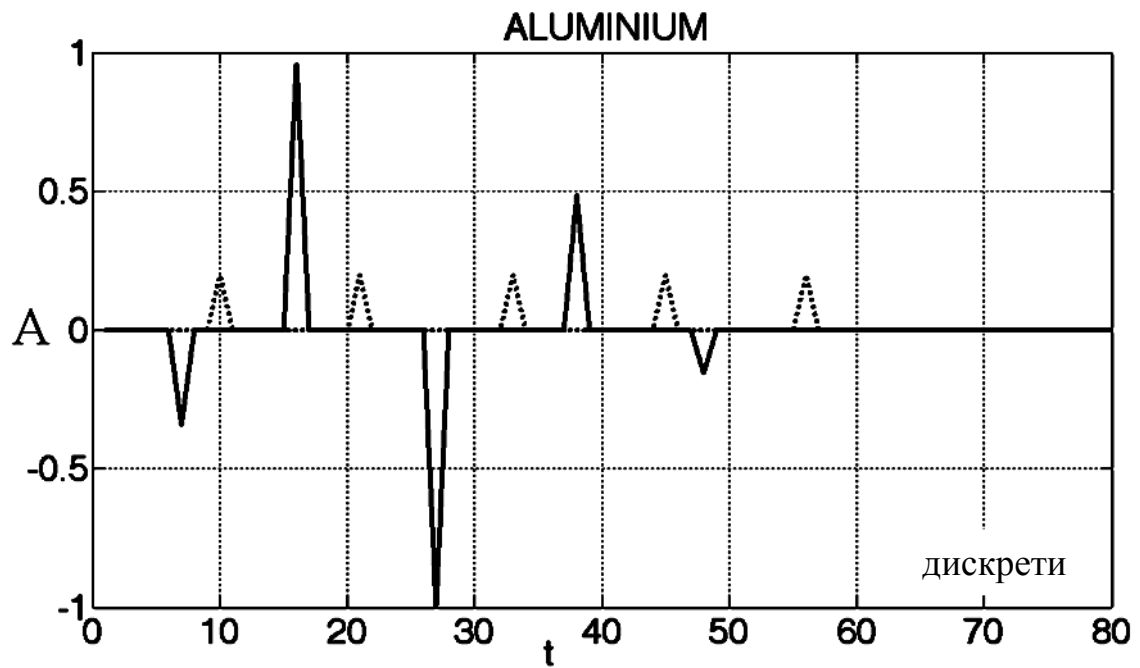


Рисунок 4.19 – Графічний образ (матеріал – дюралюміній 10)

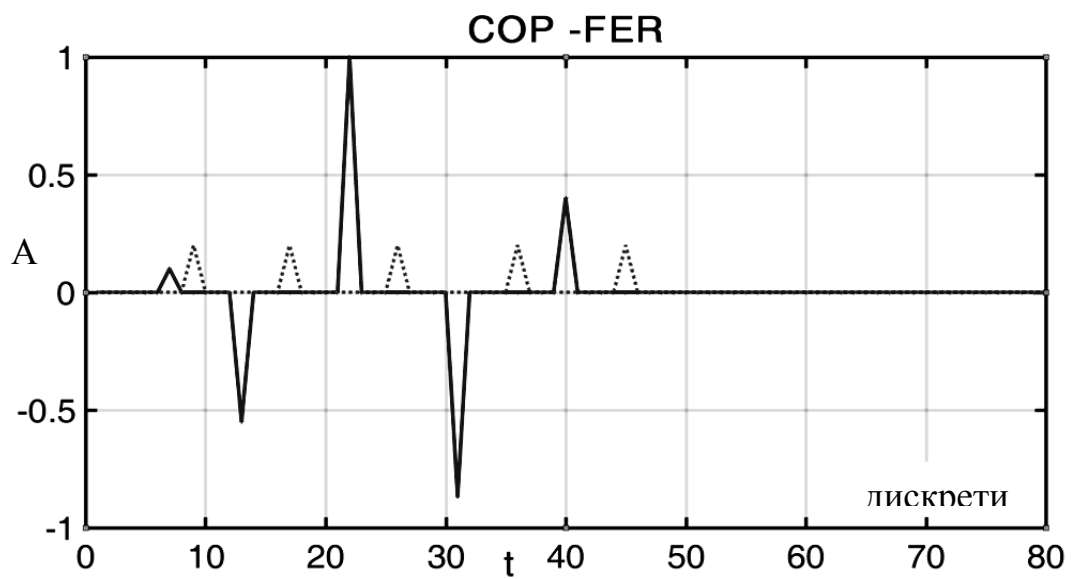


Рисунок 4.19 – Графічний образ (матеріал – сталь та мідь поруч)

З рис. 4.20 видно, що образи міді та алюмінію подібні по координатах та кількості максимумів, але по коефіцієнту $K\%$ їх можна розділити.

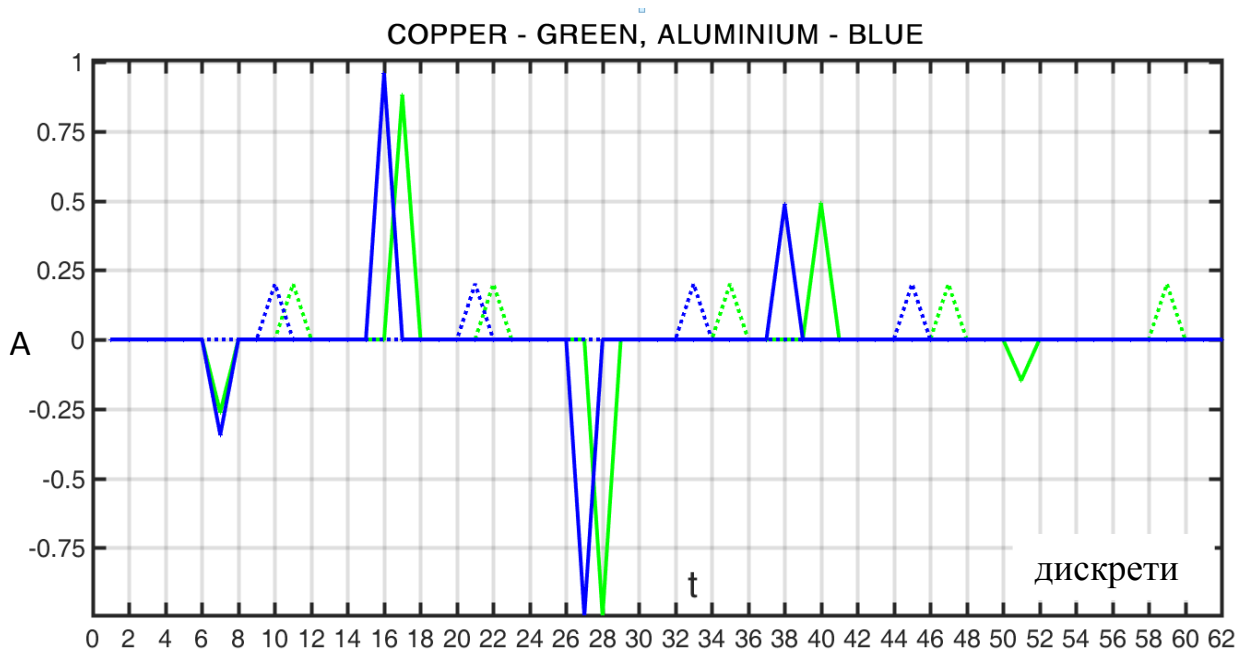


Рисунок 4.20 – Накладення графічно-цифрових образів міді (зеленим кольором) та алюмінію (синім кольором)

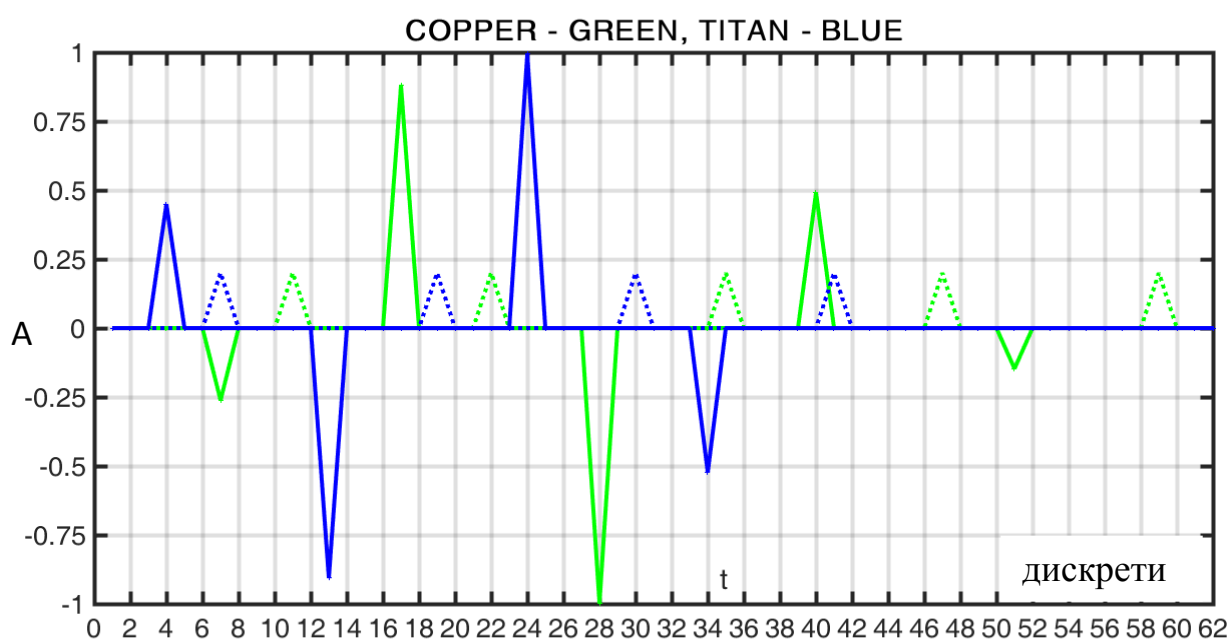


Рисунок 4.21 – Накладення графічно-цифрових образів міді (зеленим кольором) та титану (синім кольором)

З рис. 4.21 видно, що образи міді та титану відрізняються як по кількості максимумів так, і по їхній полярності та К%.

4.4. Результати та їх обговорення

На основі отриманих даних про магнітні та немагнітні метали, що відображені у попередніх підрозділах (4.2 та 4.3) сформовано зведену таблицю параметрів металів (табл. 4.6). Розрізнення металів між собою спектральними методами наведено у табл. 4.7, а методом графічно-цифрових образів наведено у табл. 4.8.

З табл. 4.6 видно, що спектральні характеристики для різних металів відрізняються одна від одної смугою та площею під обвідною. Як видно із табл. 4.7, деякі метали близькі за характеристиками, тому відрізнити їх один від одного достатньо складно.

Наприклад, мідь електротехнічна та срібло 868 проби за своїми спектральними характеристиками подібні, тому при розрізненні міді та срібла інших проб може виникати невірний результат.

Їх розрізнення вимагає високоточних приладів для вимірювання спектральних характеристик. Однак збільшити достовірність розрізнення можна, якщо використовувати одночасно спектральний метод та запропонований в роботі метод графічно-цифрових образів.

При використанні методу графічно-цифрових образів відбувається розрізнення металів за формою відбитого сигналу та за величиною розрахованого інформативного коефіцієнта $K\%$.

Значення математичного очікування інформативних коефіцієнтів $K\%$ наведено у табл. 7, а графічно-цифрові образи наведено у підрозділах 4.2 та 4.3.

Табл. 4.7 подібна із табл. 2.3, що із урахуванням розкиду параметрів електронних компонентів РС (резистори, конденсатори) є допустимим.

Таблиця 4.6 – Параметри базових спектральних характеристик досліджених зразків

| Метал | Ширина спектра по рівню -40дБ (Гц) | Площа під обвідною спектру (дБ·Гц) |
|----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Сталь 20 | $4,21 \pm 0,14 \dots 23,18 \pm 0,25$ | $430,1 \pm 3,77$ |
| Мідь електрот. | $6,51 \pm 0,19 \dots 27,33 \pm 0,31$ | $568,9 \pm 4,61$ |
| Срібло 900 пр. | $6,24 \pm 0,16 \dots 26,70 \pm 0,22$ | $535,5 \pm 4,6$ |
| Титан | $7,21 \pm 0,21 \dots 25,83 \pm 0,31$ | $506,2 \pm 4,0$ |
| Сурьма | Сигнал відсутній | Сигнал відсутній |
| Золото 900 пр | $6,47 \pm 0,15 \dots 27,97 \pm 0,12$ | $545,0 \pm 3,3$ |
| Свинець | $6,64 \pm 0,29 \dots 28,14 \pm 0,26$ | $547,6 \pm 4,9$ |
| Вісмут | $4,85 \pm 0,11 \dots 28,43 \pm 0,36$ | $604,9 \pm 9,8$ |
| Дюралюміній 10 | $6,41 \pm 0,22 \dots 28,08 \pm 0,23$ | $551,3 \pm 4,6$ |
| Нікель | $9,19 \pm 0,18 \dots 27,56 \pm 0,26$ | $483,41 \pm 4,8$ |
| Ніодім | Сигнал відсутній | Сигнал відсутній |
| Самаро-кобальт | Сигнал відсутній | Сигнал відсутній |
| Ферит | Сигнал відсутній | Сигнал відсутній |

Таблиця 4.7 – Розрахована різниця в параметрах між міддю та іншими металами

| Метали, що порівнюються | Різниця площ під обвідними, ΔS | Різниця по центральних смугах, Δf |
|----------------------------|---|--|
| Срібло та мідь | 7,50% | 4,61% |
| Золото та мідь | 5,30% | 1,77% |
| Мідь та титан | 16,10% | 11,42% |
| Мідь та свинець | 2,26% | 2,01% |
| Мідь та дюралюміній | 8,54% | 8,12% |

Таким чином, спектральний метод дозволяє ідентифікувати тип металу в середині групи кольорових металів.

Таблиця 4.8 – Розрахована різниця в параметрах між двома інформативними максимумами для досліджуваних металів.

| Назва зразка | K% – відсоткова різниця між двома максимумами | Полярність 1-го екстремуму |
|--|---|----------------------------|
| Сталь 20 | $13,88 \pm 0,95$ | + |
| Мідь електротехнічна | $43,99 \pm 0,35$ | - |
| Срібло 9999 проба | $41,79 \pm 0,44$ | - |
| Срібло 900 пр. рубль 1896р. Р.I. | $44,66 \pm 0,37$ | - |
| Срібло 900 пр. 50 копійок 1912р. Р.I. | $44,81 \pm 0,43$ | - |
| Титан | $51,10 \pm 0,67$ | + |
| Золото 900пр | $43,22 \pm 0,32$ | - |
| Свинець | $47,06 \pm 0,43$ | - |
| Вісмут | $46,26 \pm 0,28$ | + |
| Дюралюміній 10 | $49,37 \pm 0,25$ | - |
| Нікель | $37,89 \pm 0,39$ | + |
| Ніодім | Сигнал відсутній | Сигнал відсутній |
| Самаро-кобальт | Сигнал відсутній | Сигнал відсутній |
| Ферит | Сигнал відсутній | Сигнал відсутній |

Поєднання розроблених методів аналізу металів дозволило вирішити задачу генерації ознак, яка полягає в виборі тих ознак, які в достатній мірі описують об'єкт, що досліджується.

Таким чином, на основі отриманих даних можна накопичувати базу образів різних металів і побудувати класифікатор металів.

4.5. Дослідження електромагнітної природи відбитого сигналу

Для пояснення електромагнітної природи відбитого сигналу розглянемо глибину проникнення поля та вплив масогабаритних характеристик на амплітуду відбитого сигналу.

4.5.1. Розрахунок глибини проникнення

Глибина проникнення електромагнітної хвилі в провідне середовище D – це відстань, на якій хвиля загасає у e (2.71) раз. Величина D може бути визначена з виразу [91]: $D=1/k$, де k – коефіцієнт, що визначає вплив провідності на глибину проникнення електромагнітних хвиль у товщу металу.

Глибина проникнення залежить від властивостей провідного середовища (ρ та μ_r) та частоти ω .

Відповідно до [91], для хвилі з частотою $f = 6600$ Гц, що проникає у провідне середовище з $\rho=5,81 \cdot 10^7$ (Ом·м) $^{-1}$, $\mu_a = 1,256 \cdot 10^{-6}$

$$\text{та } k = \sqrt{\frac{\omega \rho \mu_a}{2}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 6600 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 5,81 \cdot 10^7}{2}} = 1,227 \cdot 10^3 \quad \text{м}^{-1},$$

величина $D = 1/k = 815,1 \cdot 10^{-6}$ м (близько 815 мкм). Розподіл поля всередині зазначеного провідного середовища еліптичного перетину показано на рис. 4.22.

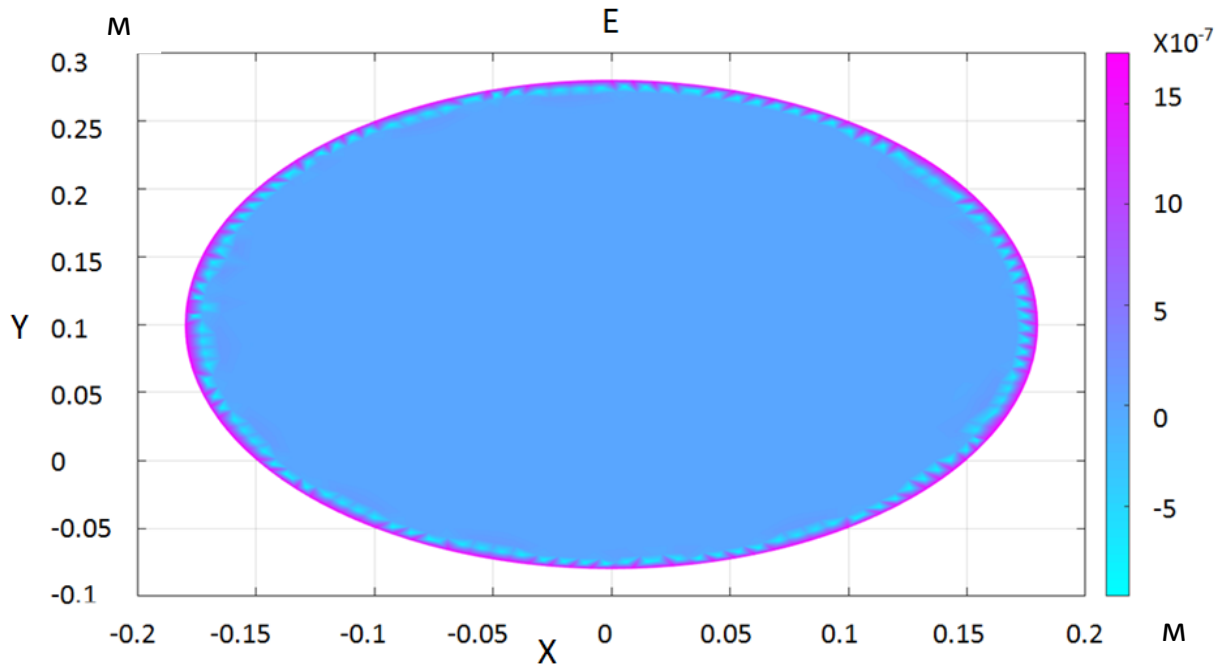


Рисунок 4.22 – Розподіл електромагнітного поля при проникненні у провідник [9]

Розрахунок отримано здобувачем за допомогою моделі PDETOOLS в середовищі Матлаб.

4.5.2. Питома амплітуда металів

4.5.2.1 Вплив товщини зразка на відбитий сигнал

Вплив товщини d металевого зразка на амплітуду відбитого сигналу вивчався на зразках мідних пластин з розмірами, наведеними в табл. 4.9.

Як видно, амплітуди сигналу, відбитого від досліджуваних зразків, що мають однакову площу, але різні товщини (пластини виготовлені з електротехнічної міді товщиною 2 мм та 1 мм та з електротехнічної мідної фольги товщиною 40 мкм) зменшуються зі зменшенням товщини зразка, а від зразка, виготовленого з фольги, сигнал взагалі зникає. Це в першу чергу можна пояснити глибиною проникнення електромагнітної хвилі в товщу

металу $D \approx \sqrt{\frac{1}{\mu \omega \sigma}}$, яка залежить від відносної магнітної проникності μ , електропровідності σ та робочої частоти ω [91]. Для міді це значення на робочій частоті системи (6,6 кГц) складає 0,83 мм, тому для тонкої пластини ($d = 40$ мкм) відбитий сигнал практично відсутній, оскільки він не може сформуватися.

Таблиця 4.9 – Геометричні розміри для пластин із електротехнічної міді

| Метал мідь електр | Довжина (мм) | Ширина (мм) | Товщина | Амплітуда сигналу відносних одиниць |
|----------------------|-----------------|----------------|---------|--|
| Пластина 1 | 60 | 20 | 2 мм | 70 |
| Пластина 2 | 60 | 20 | 1 мм | 25 |
| Пластина 3 | 60 | 20 | 40 мкм | 0 |

Густина струму, що наводиться електромагнітним полем в металевому зразку, змінюється за експоненціальним законом [91] $j(y) = j_0 e^{-\frac{y}{D}}$, де y – координата, що перпендикулярна до поверхні зразка. Тобто, у зразках з $d \geq D$ не весь наведений струм, який формує відбитий сигнал, протікає в межах приповерхневого шару товщиною D , і, відповідно, зі збільшенням товщини зразка збільшується і значення відбитого сигналу.

Аналізуючи наведені вище дані, можна зробити висновок, що електромагнітний сигнал, випромінюваний "антенною", відбивається не від поверхні металу, а проникає в середину металевого об'єкту і взаємодіє практично з усім об'ємом зразка.

Такий результат можна пояснити тим, що теоретичний розрахунок опирається на електричну компоненту поля, на основі цього ж класичного розрахунку і побудована модель у пакеті Матлаб. У роботі ж використана

магнітна "антена", яка працює з магнітною компонентою, тому результати експерименту відрізняються від теоретичного розрахунку.

4.5.2.2. Вплив магнітних властивостей зразка на відбитий сигнал

У табл.4.10 наведено результати експериментів із сильно магнітними металами.

Таблиця 4.10 – Вплив магнітних властивостей на відбитий сигнал

| Метал (магніт) | Довжина (мм) | Ширина (мм) | Товщина (мм) | Амплітуда сигналу відносних одиниць |
|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|--|
| Ніодім | 30 | 20 | 15 | 0 |
| Самаро- кобальтовий | 30 | 20 | 15 | 0 |
| Ферит | 50 | 30 | 10 | 0 |

Із табл. 4.10 видно, що сигнал від магнітних металів відсутній, це можна пояснити тим, що на поверхні цих матеріалів струми Фуко малі, які не реєструвалися експериментальною системою.

4.5.2.3. Питома амплітуда

Зважаючи на те, що матеріали, з яких виготовлені об'єкти, мають різну питому вагу та їх габарити менші "антенного" блоку системи, при дослідженні використовувалися амплітуди, приведені до маси об'єкту (відносні амплітуди). Результати вимірювання по серії дослідів приведених амплітуд для різних металів [92, 93] наведені в табл. 4.11.

У табл. 4.12 наведені результати розрахунку відносної амплітуди для зразків із міді різних габаритів.

Таблиця 4.11 – Відносні амплітуди сигналів, отриманих від різних металів

| Метал | Відносна амплітуда | Електронеутральність за Л.Полінгом [6] | Відстань від металу (мм) до "антени" |
|------------------|--------------------|--|--------------------------------------|
| Сталь 20 | 2,31 | 1,83 | 70 |
| Мідь електротех. | 7,41 | 1,90 | 70 |
| Срібло 868 проби | 3,05 | 1,93 | 70 |
| Дюралюміній 10 | 39,74 | 1,61 | 70 |
| Титан | 1,76 | 1,54 | 40 |
| Вісмут | 0,19 | 1,90 | 40 |
| Свинець | 2,52 | 1,80 | 40 |
| Сурма | 0,00 | 2,05 | 40 |
| Нікель | 10,49 | 1,91 | 40 |

На основі табл. 4.11 проведено порівняння відносної амплітуди з властивостями металів (електронегативністю, яка є властивістю атомів, зв'язаних між собою хімічними зв'язками) за таблицею “Менделєєва”. Як показав аналіз, властивості металів, оцінені за відбитими сигналами, не відповідають таблиці “Менделєєва”, адже вона має багато помилок, але добре співпадають з новою таблицею, яку введено у використання міжнародною комісією в 1989 році [94].

Із табл. 4.12 видно, що на відносну амплітуду більше впливає маса чим габарити зразка, цим і можна пояснити, чому відсутній сигнал від тонкої фольги великих габаритів.

Так, для ряду металів – титан, сталь, мідь, алюміній, відносна амплітуда сигналів зростає з номером групи у новій таблиці (рис. 4.21 та табл. 4.13). Для металів однієї групи – мідь, срібло, золото, амплітуда зменшується у вертикальному напрямі зверху вниз. Метали – алюміній, свинець, вісмут,












належать до одного сімейства постперехідних металів, але вони стоять в різних рядках таблиці, тому їх амплітуди істотно відрізняються. Вісмут взагалі випадає з таблиці – він стоїть в одному горизонтальному рядку праворуч свинцю, але всупереч його положення в таблиці амплітуда на порядок менше, цей факт потребує досліджень. Для сурми відсутність відбитого сигналу можна пояснити приналежністю її до іншого сімейства таблиці – металоїдів.

Таблиця 4.12 – Відносні амплітуди сигналів, отриманих від мідних зразків різних габаритів

| Метал | Відносна амплітуда | Розміри зразка та габарити | Відстань від металу (мм) до "антени" |
|----------|--------------------|---|--------------------------------------|
| Зразок 1 | 5,98 | маса – 7,2 г; розмір – 20x20x2 мм | 60 |
| Зразок 2 | 6,57 | маса – 10,8 г; розмір – 20x30x2 мм | 60 |
| Зразок 3 | 6,92 | маса – 18,93 г; розмір – діаметр 25,4 мм, товщина 3 мм | 60 |

Як видно пиітома, амплітуда зростає зліва направо по групах таблиці Менделєєва, це ж відбувається і з параметром електронегативності, що характеризує внутрішній стан речовини, відносно зміщення ковалентного зв'язку в бік іонного. В межах однієї групи параметри електронегативності та відносна амплітуда зменшуються зверху до низу, що видно із результатів вимірювання цих параметрів для міді та срібла. Це співпадає зі значеннями для перехідних металів. Алюміній, як постперехідний метал, має значно більше значення електронегативності та питомої амплітуди.

Таблиця 4.13 – Показано позначення різних груп елементів таблиці Менделєєва 1989р

| Сімейства хімічних елементів | | | |
|---|-------------------------|---|---|
|  | Лужні метали |  | Інші неметали (16-та (VI) група — халькогени) |
|  | Лужноземельні метали |  | Галогени |
|  | Перехідні метали |  | Благородні гази |
|  | Постперехідні метали |  | Лантаноїди |
|  | Напівметали — металоїди |  | Актиноїди |
|  | Суперактиноїди | | |

Аналізуючи вище сказане [95], можна зробити висновок, що електромагнітний сигнал, випромінюваний приймальною "антенною" ВСП, не відбивається від поверхні прихованого металу, важливим фактором на відбитий метал є глибинні процеси у товщі зразка.

4.6. Порівняння методів для задачі аналізу металів

Порівняння результатів вимірювання для аналізу металів спектрального методу, методу лінійного передбачення та методу графічно-цифрових образів [96-98] наведено у табл. 4.14. В табл. 4.15-4.16 наведено імовірність правильної ідентифікації металу (мідь та дюралюміній по 100 штук пластин однакових розмірів: 20:25:3 мм).

Таблиця 4.14 – Порівняння можливості аналізу металів використаними методами на прикладі електротехнічної міді та золота 900проби

| Метод аналізу | Можливості до аналізу Металів | Відсоткова різниця між металами задана даним методом (на прикладі Мідь електр. – Золото 900 пр.) |
|---------------------------|---|---|
| Лінійного передбачення | З обмеженими можливостями | – |
| Спектральний | Можна аналізувати різні метали як узагальнений образ | По площі – 5,60%. По ширині спектру – 1,67% |
| Графічних образів | Можна аналізувати різні метали як узагальнений образ | По коефіцієнтах K% – 2,19% |

Рішення про подібність невідомого металу до існуючого в базі приймається на основі матриці відмінностей (стовпчики 1-5 табл.4.15 – 4.16). Вибирається рядок з найбільшим числом мінімальних розбіжностей (вибрані позиції в табл. 4.15 – 4.16 **виділено товстим**) і для даної позиції розраховується відсоткова подібність, шляхом усереднення лише мінімальних значень.

Таблиця 4.15 – Імовірність правильної ідентифікації міді

| Метал еталонний | Метал - мідь | | | | | | |
|--------------------|---|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------------------|------------------|
| | Відмінність %, за кожним із інформативних параметрів | | | | | % подібність до еталону | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| Метал | Поляр | S | F _n | F _v | K% | Спектр. метод | Часовий метод |
| Сталь | 100 | 17,940 | 43,340 | 15,970 | 68,420 | | |
| Мідь | 0 | 6,281 | 0,857 | 0,1685 | 0,067 | 99,48% | 99,93% |
| Золото 900 | 0 | 0,606 | 4,102 | 1,987 | 1,684 | | |
| Вісмут | 100 | 6,6045 | 27,855 | 3,606 | 4,971 | | |
| Срібло 9999 | 0 | 0,423 | 2,037 | 1,580 | 4,937 | | |
| Срібло 900 | 0 | 2,573 | 0,857 | 0,422 | 1,698 | | |
| Нікель | 100 | 8,620 | 28,349 | 2,419 | 13,808 | | |
| Титан | 100 | 0,866 | 8,896 | 1,459 | 13,808 | | |
| Дюралюм. | 0 | 1,742 | 4,840 | 2,475 | 10,957 | | |

Кількість вірної ідентифікації міді: 92 раз з 100, імовірність 0,92.

З табл. 4.14 – 4.16 видно, що при розрізненні металів потрібно враховувати результати як спектрального методу, так і методу графічно-цифрових образів, оскільки різні інформативні параметри дозволяють отримати більше інформації про метал.

Таблиця 4.16 – Імовірність правильної ідентифікації дюралюмінію

| Метал еталонний | Метал новий: дюралюміній | | | | | | |
|--------------------|---|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------------------|------------------|
| | Відмінність %, за кожним із інформативних параметрів | | | | | % подібність до еталону | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| Метал | Поляр | S | Fn | Fv | K% | Спектр. метод | Часовий метод |
| Сталь | 100 | 21,111 | 44,779 | 20,099 | 72,300 | | |
| Мідь | 0 | 2,516 | 3,363 | 4,743 | 12,211 | | |
| Золото 900 | 0 | 3,274 | 6,527 | 2,975 | 13,748 | | |
| Вісмут | 100 | 2,853 | 29,679 | 1,346 | 7,681 | | |
| Срібло 9999 | 0 | 3,452 | 4,514 | 6,407 | 16,602 | | |
| Срібло 900 | 0 | 1,322 | 3,363 | 4,501 | 10,754 | | |
| Нікель | 100 | 12,148 | 26,491 | 7,204 | 24,385 | | |
| Титан | 100 | 4,694 | 6,533 | 3,495 | 24,385 | | |
| Дюралюм. | 0 | 1,156 | 2,246 | 2,489 | 1,475 | 98,29% | 98,52% |

Кількість вірної ідентифікації дюралюмінія: 90 раз з 100, імовірність 0,90.

Висновки до розділу 4

1. Розроблена та експериментально перевірена методика проведення вимірювань параметрів для спектрального та часового методів.

2. Розроблена та виготовлена експериментальна цифрова радіотехнічна система для розрізнення металів. Розроблена структурна схема, схема електрична принципова, макет та математичний апарат, що дозволяють реалізувати запропоновані алгоритми обробки сигналу.

3. Експериментальна цифрова система дозволила провести детальний аналіз бази із більше чим 10-ти різних типів металів та їх розпізнати.

4. Поєднання результатів аналізу сигналів обома методами дозволяє з імовірністю більше 0,9 правильно ідентифікувати тип металу.

5. Накопичена база металів дозволила запропонувати як інформативний параметр поняття питомої амплітуди (амплітуди отриманого сигналу, приведеної до маси об'єкту). Питома амплітуда дозволяє порівнювати метали між собою, не прив'язуючись до їх розмірів. Використання цього поняття дозволило встановити, що електромагнітний сигнал, який реєструється прийнятною "антенною" цифрової системи, не відбивається від поверхні прихованого металу, а проникає в середину металевого об'єкту і взаємодіє зі всією масою зразка. Це дозволило у відповідності до теорії про електронегативність Бенсона–Полінга розподілити метали по групах, які співпадають із новою таблицею хімічних елементів, що запроваджена у 1989р. міжнародною комісією на заміну традиційній таблиці «Менделєєва».

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача з удосконалення вихрострумowego методу контролю для ідентифікації металевих предметів. Основні наукові та практичні результати роботи полягають в наступному:

1. Проведено огляд існуючих найбільш поширених методів (рентгено-флуоресцентний, оптико-емісійний та хімічний) ідентифікації металів та вказано їхні недоліки – вони є лабораторними. Сформульовано подальший напрям досліджень, що полягає у використанні альтернативного напрямку – вихрострумowego.

Запропонований новий динамічний метод визначення типу металів на основі вихрових струмів, який дозволяє дистанційно та оперативно визначати тип металу. Що на відміну від хімічного, рентгенівського та опто-емісійного, дозволяє аналізувати склад досліджуваних об'єктів без пошкодження поверхні об'єкту (зачищення, шліфування, тощо). Аналіз відбувається швидко завдяки використанню сучасних цифрових технологій.

2. Створено робочий лабораторний макет та система обробки отриманих сигналів, яка використовує обробку сигналу в часовій області (метод графічних образів) та спектральній (спектральний метод обробки) – це розширило функціональні можливості вихрострумowych пристроїв, збільшено номенклатуру типів металів, які можна ідентифікувати.

3. Вперше показано, що аналіз 5-ти інформативних ознак в характеристиках сигналу, отриманого в результаті взаємодії зондувального електромагнітного поля з прихованим металевим об'єктом таких, як – форма сигналу, екстремальні значення сигналу в часовій області (мінімуми та максимуми) та переходи сигналу через нульовий рівень, площа під обвідною спектру та смуга сигналу, дозволяє дистанційно розрізняти метали. Застосування методу вихрових струмів дозволило спростити процес

ідентифікації металів, адже метал досліджується дистанційно і не пошкоджується.

– Показано, що спектральний метод дозволяє ідентифікувати тип металу, оскільки існує різниця в характеристиках спектрів сигналів отриманих від різних металів. Завдання ідентифікації металів зводиться до визначення попадання спектрів еталонних зразків в отриманий спектр. Показано, що спектральний метод може бути використаний і в випадку, коли два об'єкти знаходяться у безпосередній близькості один від одного. Співвідношення між площами виміряного та еталонних спектрів вказує на відсотковий вміст конкретних металів.

– Вперше запропоновано та розроблено метод часового аналізу сигналу, побудованого на заміні сигналу графічно-цифровими образами. Часовий сигнал, отриманий системою, оцифровується і перетворюється в графічний образ, в якому безперервна зміна сигналу замінюється характерними лініями, які відрізняються координатами, висотою і полярністю та пов'язані з екстремумами сигналу та переходом його через нуль. Запропонований метод дозволяє сигнал представити як діаграму із інформативних ознак, яка для різних металів є різною, а це дозволяє провести ідентифікацію металу за результатами її порівняння з попередньо записаними даними.

4. За допомогою системи контролю проведені експериментальні дослідження бази сигналів більше чим від 10-ти типів металів із складу підгруп чорних та кольорових металів. Накопичена база сигналів від металів дозволила запропонувати як інформативний параметр, поняття відносної амплітуди (амплітуди отриманого сигналу, приведеної до маси об'єкту). Використання цього поняття дозволило встановити, що електромагнітний сигнал, який реєструється приймальною “антенною”, не відбивається від поверхні прихованого металу, а проникає в середину металевого об'єкту і взаємодіє зі всією масою зразка. Це дозволило у відповідності до теорії про електронегативність Бенсона–Полінга розподілити метали за групами, які

співпадають із «новою» таблицею хімічних елементів, що запроваджена у 1989 р. міжнародною комісією на заміну традиційній таблиці «Менделєєва».

5. Поєднання результатів спектрального методу та методу графічно-цифрових образів дозволяє створювати базу образів еталонних сигналів, необхідну для аналізу металевих об'єктів як узагальнений образ. Ідентифікація типу металу відбувається з імовірністю більше 0,9.

6. Працездатність розробленого динамічного методу підтверджена діючим макетом. Розроблена та експериментально перевірена методика проведення вимірювань параметрів для спектрального та часового методів.

7. Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри радіотехнічних пристроїв та систем радіотехнічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського, а також в дослідницьку діяльність ЦНДІ ОБТ ЗСУ ДР 0117U00062д.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамович А. О. Дистанційний вихорострумний аналіз складу металевих об'єктів / А. О. Абрамович, В. О. Піддубний, І. С. Каширський // Міжнародний науково-технічний журнал «Металлофизика и новейшие технологии». – Київ. – 2017. Том.39 Вип. №8. – С. 1035-1049. (Scopus) URL: <http://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v39/i08/1035.html>
2. Abramovych A. O. Application of spectral analysis for distinguishing metals by signals from eddy current converters / A. O. Abramovych, V. O. Poddubny // The East European Journal of Advanced Technology.– Kharkiv.– 2017. Vol. 89 (No. 5). P. 51 – 57 (Scopus) DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110177>
3. Абрамович А. О. Металодетектори / А. О. Абрамович, С. М. Дяченко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – Київ.– 2011. – Вип. №46. – С. 186-193.
4. Добыча полезных ископаемых // Горная энциклопедия / Гл. редактор Е.А. Козловский. — М.: Советская энциклопедия, 1986. — Т. 2. —575с.
5. Правда В. І. Георадари / В. І. Правда, О. Д. Мрачковський, А. О. Абрамович // Вісник національного університету “Львівська політехніка”, Серія : радіоелектроніка та телекомунікації. – Львів.– 2015. – № 818. – С. 49-54. (IndexCopernicus)
6. Абрамович А. О. Дихотомічне розрізнення металу на чорний-кольоровий за допомогою спектрального аналізу / А. О. Абрамович, О. Д. Мрачковський, В. Ю. Фурманчук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Сер: Технічні науки. – Житомир.– 2017. – Вип. №1(79). – С. 48-51.
7. Новицкий Л. А. Оптико–электронные приборы для научных исследований / Л. А. Новицкий, А. С. Гоменюк, В. Е. Зубарев, А. М. Хорохоров. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.

8. Бахтиаров А. В. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ в геологии и геохимии / А. В. Бахтиаров – Л.: Недра, 1986. – 144с.
9. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. Гринева А. Ю. М.: Радиотехника, 2005.– 416 с.
10. Абрамович А. О. Радіолокаційно-вихрострумний радар / А. О. Абрамович // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – Київ.– 2014. – Вип. №57. – С. 77-82.
11. Абрамович А. О. Виявлення в сигналі георадара класифікаційних ознак для розрізнення кольорових металів / А. О. Абрамович // Матеріали науково-технічної конференції "Фізика, електроніка, електротехніка". – Суми.– 2015. – С. 154
12. Абрамович А. О. Металодетектори / А. О.Абрамович, С. М. Дяченко // Матеріали V науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Радіoeлектроніка в ХХІ столітті». –Київ. – 2011. – С. 140 – 141.
13. А. с. № 73585 Часовий метод виявлення металевих об'єктів у діелектричному середовищі / А. О. Абрамович, В. О. Піддубний, І. С. Каширський (Україна); заявк подано. 20.06.2017, опубліковано 28.08.2017
14. Абрамович А.О. Металодетектор за принципом дії ВFO / А.О.Абрамович // Матеріали IV науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Радіoeлектроніка в ХХІ столітті". – Київ. – 2010. – С. 245-247
15. Дослідження можливості застосування кепстрального аналізу сигналів металошукача з метою дихотомічного визначення типу металу: звіт про НДР (заклучн.) / Київський політехнічний інститут (КПІ); кер. О. Д. Мрачковський ; викон.: А. О. Абрамович. – К., 2016. – 112 с. – № ДР 0116U006188. – Інв. № 07160006566.

16. Патентний відділ США, патент №4,783,630, МПК G01V 3/11. Дата патентування: Nov 8 1988. Metal detector with circuits for automatically screening out the effects of offset and mineralized ground.

17. Obiazi A. M. Implementing a Robust Metal Detector Utilizing the Colpitts Oscillator with Toroidal Coil / A. M. Obiazi, F. I. Anyasi, O. O. Jacdonmi // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2010.– 5(2).– P.56 – 63.

18. Щербаков Г. Н. Выбор электромагнитного метода зондирования для поиска объектов в толще укрывающих сред / Г. Н. Щербаков // “Радиотехника”. – 2005. – № 3. – С. 77 – 79.

19. Radar Upgrades Handheld Mine Detectors. Jane's International Defense Review. February 1997.

20. Патентний відділ США, патент № US 7.109.910 B1 Дата патентування: Sep.19.2006. Mine detection using radar vibrometer

21. Хабаров В. Б., Структура электромагнитного поля, излученного подземным передатчиком с рамочной антенной, с учетом ближней зоны распространения радиоволн / В. Б. Хабаров // “Радиотехника”. – 2005. – № 3. – С. 80 – 83.

22. Неразрушающий контроль [Текст]: у 5-ти т. / Под ред. В. В. Сухорукова – М.: Высш. шк., Т.3. – 1992. – 312с.

23. Калантаров П. Л. Расчет индуктивностей: Справочная книга. — 3-е изд., перераб. и доп. / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с.

24. А. с. № 70479 Метод виявлення металевих предметів у діелектричному середовищі / А. О. Абрамович (Україна); заявк. 22.12.2016, опубліковано 16.02.2017

25. А. с. № 70945 Спосіб розрізнення металів на чорні та кольорові з використанням коефіцієнтів лінійного передбачення за даними металошукача на основі вихрових струмів: / А. О. Абрамович, С. Я. Жук (Україна); заявк. 24.01.2017, опубліковано 16.03.2017

26. Абрамович А. О. Вихрострумовий пристрій з базою даних образів для ідентифікації типів металів прихованих об'єктів / А. О. Абрамович, В. О. Піддубний, О. М. Гусяков // Науково технічний журнал "Озброєння та військова техніка". – Київ. – 2017. – №3(15). – С. 51–56.

27. Абрамович А. О. Вибрані аспекти математичної обробки сигналів георадарів / А. О. Абрамович // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2013. – С. 111 – 112.

28. Абрамович А. О. Радіолокаційно-вихрострумовий метод обробки сигналів георадарів / А. О. Абрамович // Матеріали науково-технічної конференції "Фізика, електроніка, електротехніка". – Суми. – 2013. – С. 148.

29. Звіт про НДР шифр «Тріонікс» / Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України ; – К., 2016. – № ДР 0117U00062д. – Інв. № 2778/2 ДСК – 286 с.

30. Соболев В. С. Накладные и экранные датчики (для контроля методом вихревых токов) Отв. ред. чл.-кор. АН СССР К.Б. Карандеев. / В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлет – Новосибирск: «Наука», Сиб. отд-ние, 1967. – 144 с.: ил. – (АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т автоматики и электрометрии).

31. Смекалова Т. Н., Восс О., Мельников А. В. Магнитная разведка в археологии. 19 лет применения Оверхаузеровского градиентометра GSM-19WG. Симферополь: Доля, 2010. – 76 с.

32. Grinev, A.Yu., Temchenko, V.S., Ilyin, E.V., Bagno, D.V.; "The restoration of road coats and related objects parameters based on method of computation diagnostics - Ground Penetrating Radar antennas dipole approximation", IEEE Ground Penetrating Radar (GPR), 13th International Conference. – 2010. – P. 1– 5.

33. Абрамович А. О. Метод обработки отраженных сигналов вихретоковых импульсных преобразователей / А. О. Абрамович, В. О. Піддубний, І. С. Каширський // Науковий вісник Запорізького

національного технічного університету, Радіоелектроніка, інформатика, управління.— Запоріжжя. — 2017. — Вип. №4. — С.7–14. (Web of science)
DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-4-1>

34. Абрамович А. О. Радіолокаційно-вихрострумний метод виявлення металів / А. О. Абрамович, І. О. Товкач // Матеріали науково-технічної конференції "Фізика, електроніка, електротехніка". — Суми.— 2014. — С. 167.

35. Ihamouten A. Electromagnetic dispersion estimated from multi-offset, ground-penetrating radar / A. Ihamouten, X. Dérobert, G. Villain // IEEE Ground Penetrating Radar (GPR). — 2010. — P.1 – 6.

36. Ивашов С. И., Разработка технологии голографических подповерхностных радиолокаторов и ее применение. / С. И. Ивашов, И. А. Васильев, А. В. Журавлев, В. В. Разевиг // Успехи современной радиотехники. — 2009. — №1–2. — С.5–19.

37. Абрамович А. О. Экспериментальное исследование возможности дихотомического различия черных и цветных металлов по данным металлоискателя на основе вихревых токов методом линейного предсказания / А. О. Абрамович, С. Я. Жук, О. Д. Мрачковский // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». — Київ. — 2016. — С. 14 – 16.

38. Kang W., A study of antenna configuration for bistatic ground-penetrating radar / W. Kang, C. Kim, J. Kim, S. Park, S. Cho, J. Son, K. Kim // 2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2016). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Proceedings of a meeting held 13-16 June 2016, Hong Kong. P. 552-556. ISBN 9781509051823

39. Congedo F., Monti G., Tarricone L. "Modified bowtie antenna for GPR applications", / F. Congedo, G. Monti, L. Tarricone // IEEE Ground Penetrating Radar (GPR), 2010 13th International Conference.

40. Jol M. H. Ground Penetrating Radar Theory and Applications / H. M. Joy — Oxford GB.: Elsevier B.V. 2009. — 574 p. — ISBN: 978-0-444-53348-7.

41. Абрамович А. О. Георадар для пошуку та класифікації металів / А. О. Абрамович // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2014. – С. 144 – 146.
42. Абрамович А. О. Метод графічних образів в радіотехнічній системі ближньої локації / А. О. Абрамович, І. С. Каширський, В. О. Піддубний // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2018. – С. 173 – 175.
43. Абрамович А. О. Розпізнавання металевих об'єктів за допомогою аналізу сигналу металошукача в часовій області / А. О. Абрамович // Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій". – Тернопіль. – 2016. – С. 92 – 93.
44. Щербаков Г. Н. Увеличение предельной глубины обнаружения локальных ферромагнитных объектов в толще проводящих укрывающих сред методом дистанционного параметрического подмагничивания / Г. Н. Щербаков // Радиотехника. – 2005. – № 12. – С. 42 – 45.
45. Килимник О. М. Підвищення точності радіолокаційного зондування підповерхневих об'єктів багаточастотними фазовими радіосистемами: дис. на здобуття наукового ступеня кандидата тех. наук: 05.12.17 / Килимник Олександр Михайлович. – Хм., 2015. – 164с.
46. SVATOŠ Jakub Advanced Instrumentation for Polyharmonic Metal Detectors: Ph.D Thesis: Svatoš, Jakub. – Prague, 2015. – 121p.
47. Докторська дисертація Claudio Bruschini A Multidisciplinary Analysis of Frequency Domain Metal Detectors for Humanitarian Demining: Doctor in Applied Sciences Thesis: Claudio Bruschini. – Brussels, 2002 p. – 242p.
48. Агашин О. С. Методы цифровой обработки речевого сигнала в задаче распознавания изолированных слов с применением сигнальных процессоров / О. С. Агашин, О. Н. Корелин // Труды Нижегородского

государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. –2012. – № 4(97). – С. 32 – 44.

49. Абрамович А. О. Вихрострумовий металошукач із спектральною обробкою сигналу / А. О. Абрамович, О. Д. Мрачковський, В. О. Піддубний // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2017. – С. 14 – 16.

50. Claudio Bruschini A multidisciplinary analysis of frequency domain metal detectors for humanitarian demining: Thesis to obtain degree of Doctor in Applied Sciences: Claudio Bruschini. – Brussels, 2002 . – 242p.

51. Главная [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. – Электронні дані. – Режим доступу: <http://trgeo.ru/> (20.02.2015). – Назва з екрану.

52. Products [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. – Электронні дані. – Режим доступу: <http://www.utsielectronics.co.uk/> (20.02.2015). – Назва з екрану.

53. Главная [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. – Электронні дані. – Режим доступу: <http://detector.kiev.ua/> (20.02.2015). – Назва з екрану.

54. Ивашов С. И. Использование современных методов обработки изображений в операциях по гуманитарному разминированию по материалам воздушного фотографирования / С. И. Ивашов, В. В. Разевиг, И. В. Парфенцев, И. А. Харченко, Е. Г. Алексеев // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. — 2008. — № 2. — С. 89-103.

55. Гринев А. Ю. "Численные методы решения прикладных задач электродинамики". Учеб. пособие. – М.: Радиотехника, 2012. – 336с.

56. Capineri L. J. Comparison of GPR Sensor Types for Landmine Detection and Classification, /. L. J. Capineri, S. I. Ivashov //, 12th International Conference on Ground Penetrating Radar, , Birmingham, UK. – 2008. – P. 1 – 10.

57. Zhuravlev A. V. Detection of mine-like objects in high-resolution aerial images / A. V. Zhuravlev, A.S. Bugaev, S.I. Ivashov, V.V. Razevig //, Proc. of

SPIE Vol. 6739, 673905, (2007), SPIE Europe Remote Sensing Conference, Florence, Italy, – 2007.– P. 1–8.

58. Ivashov S. I. A Review of the Remote Sensing Laboratory's Techniques for Humanitarian Demining / S. I. Ivashov, V. V. Razevig, A. P. Sheyko, I.A. Vasilyev// Proceedings of International Conference on Requirements and Technologies for the Detection, Removal and Neutralization of Landmines and UXO, EUDEM2-SCOT-2003, 15–18 September 2003, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium, – 2003. –Vol. 1. – P. 3–8.

59. Васильев И. А. Подповерхностные многочастотные голографические радиолокаторы типа "Раскан" для зондирования строительных конструкций и обнаружения миноподобных целей / И. А. Васильев, С. И. Ивашов, В. Н. Саблин, В. В. Чапурский, А. П. Шейко // Тезисы докладов. Научно-техническая конференция "Георадар в России – 2000", МГУ, Отделение геофизики, – 2000. – С. 13–15.

60. Ivashov S. I. Remote Control Mine Detection System with GPR and Metal Detector. / S. I. Ivashov, V. I. Makarenkov, V. V. Razevig, V. N. Sablin , A. P. Sheyko , I. A. Vasiliev // Eight International Conference on Ground-Penetrating Radar, GPR'2000, , University of Queensland, Gold Coast, Queensland, Australia, – 2000. – P. 36–39.

61. Ivashov S. I. Wide-Span Systems of Mine Detection / S. I. vashov, V. I. Makarenkov, V. V. Razevig, V. N. Sablin, A. P. Sheyko, I. A. Vasiliev // Mine Identification Novelties Euroconference. Villa Agape, Firenze – Italy, –1999. – P. 137–141.

62. Румшицкий Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшицкий. – М.: Наука, Глав. ред. физ–мат. лит., 1971. – 192 с.

63. Прата Стивен Язык программирования C++. Лекции и упражнения / Стивен Прата . – Вильямс, 2012. – 1248с. ISBN 978-5-8459-1778-2

64. Abramovych A. O. Rationing of signals of eddy – current converters for correct comparison of them / A. O. Abramovych, V. O. Poddubny // Bulletin of the Ternopil National Technical University. Ser: Technical sciences. –Ternopil. – 2017. – Volume 86 (№2) .P.76 – 83.

65. Абрамович А. О. Класифікаційна ознака у сигналі георадара, що дозволяє розрізняти конкретний тип металу / А. О. Абрамович // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи».– Київ. – 2015. – С. 142 – 144.

66. Глинченко А. С. Цифровая обработка сигналов: Учеб. пособие: В 2 ч. Ч. 2. / А.С. Глинченко // Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001. 184 с.

67. Слюсар В.И. Синтез алгоритмов измерения дальности М источников при дополнительном стробировании отсчетов АЦП / В.И. Слюсар // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1996. – Том 39. – № 5. – С. 55 - 62.

68. Слюсар В. И. Развитие схемотехники ЦАР: некоторые итоги. Часть 2. / В.И. Слюсар // Первая миля. Last mile (Приложение к журналу "Электроника: наука, технология, бизнес"). – N2. – 2018. – С. 76 - 80.

69. Слюсар В.И. Цифровые методы оценивания временного положения колоколообразных радиоимпульсов. / В.И. Слюсар // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника.– 1997. – Том 40, № 1.– С. 33 - 38.

70. Слюсар В.И. Оценка формы коротких импульсов большой мощности / В.И. Слюсар // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника.– 2003. – Том 46. – № 11. – С. 50 - 53.

71. Баженов В. Г. Метод и аппаратура для измерения напряжённости электрических полей при геолого-геофизических исследованиях / В. Г. Баженов, Н. А. Якимчук, С. В. Грузин, И. С. Пидлисн // Зб. наук. праць “Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики”. – 2014. – С.17–30.

72. Махонин Г. М. Обнаружение локационных объектов в сложных средах с поглощением, журн. “Радиотехника”, 2006. – № 2. – С. 90–95.

73. Андрианов В. А. Подповерхностная радиолокация слоисто-неоднородного грунта планеты / В. А. Андрианов // Радиотехника и электроника. – 1992. – Т. 37. – № 11. – С. 1937 – 1948.

74. ГОСТ 24289-80 Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения.

75. Hans A. van Sprang Fundamental parameter methods in XRF spectroscopy / A. van Sprang Hans // Advances in X-ray Analysis. 2000. – Vol.42. P 1 – 10.

76. Daniels D. J. Ground Penetrating Radar (2nd Edition) / D. J. Daniels. – London, UK.: Institution of Electrical Engineers, 2004, – 761p. – ISBN 0 86341 360.

77. Space and airborne Mined Area Reduction Tools [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <http://www.smart.rma.ac.be/>. – Назва з екрана.

78. Pernar R., Sapina R., Marinov A., Vuletic D., Matic C. & Bajic M. The relevance, strength and likelihood of occurrence of the mine-field indicators and signatures used in the airborne and space-borne remote sensing of mine contaminated areas New Strategies for European Remote Sensing, Oluic (ed.) © 2005 Millpress, Rotterdam, ISBN 90 5966 003 X

79. Carter L.J., O'Sullivan M.J., Hung Y.J., Teng J.C-C. Thermal Imaging for Landmine Detection. In Proc. of Second International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines, MD'98. Edinburgh, UK, 1998. – P. 110 – 114.

80. Маркел Дж. Д., Грэй А.Х. Линейное предсказание речи: Пер. с английского / Под редакцией Ю.Н. Прохорова и В.С. Звездина. – Москва: Издательство «Связь», 1980. – 308с.

81. Абрамович А. О. Розрізнення образів металевих об'єктів за допомогою спектрально – часового аналізу сигналу вихрострумового металошукача / А. О. Абрамович // Матеріали IV міжнародної науково-

практичної конференції: "Проблеми координації військово-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння і військової техніки". – Київ. – 2016. – С. 57.

82. Абрамович А. О. Распознавание металлических объектов с помощью анализа временных сигналов / А. О. Абрамович, І. С. Каширський, О. Д. Мрачковський // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2017. – С. 14 – 16.

83. Абрамович А. О. Накопичення бази даних образів про металеві предмети, як метод підвищення ефективності металошукачів / А.О. Абрамович, В. О. Піддубний, С. А. Цибуля // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції "Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ". – Львів. – 2017. – С. 256 – 257.

84. IEEE Xplore, Proceedings of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). DOI: 10.1109/ICGPR.2012.6254822.

85. Diamanti, L., Annan, P., 2013. Characterizing the energy distribution around GPR antennas. J. Appl.Geophys., this issue.

86. Березин И. С. Методы вычислений / И. С. Березин, Н. П. Жидков . – М.: Наука : 1966. – 464 с.

87. Кунц К. С. Численный анализ / К. С. Кунц. – М.: Техника: 1964. – 390с.

88. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц 2-е изд., доп. / Ф. Р. Гантмахер. – М.: Наука, 1966. – 576 с.

89. Dmitrienkov A. A. Passive-Active MM Wave Radiometer for Detection of Mines installed on the Ground Surface. / A. A. Dmitrienkov, S. I. Ivashov, V. N. Sablin, B. A. Ufraykov // In Proc. of 5th International Conference on Radar Systems. Brest, France. – 1999. P. 17 – 21.

90. Ivashov S. I. The Holographic Principle in Subsurface Radar Technology. / S. I. Ivashov, V. V. Razevig, I. S. Vasilyev, A. V. Zhuravlev, //, International

Symposium to Commemorate the 60th Anniversary of the Invention of Holography, Springfield, Massachusetts USA, 2008. – P. 183 – 197.

91. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. 8-е изд., перераб. и доп. / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1986. – 263 с.

92. Абрамович А. О. Модифікована радіотехнічна система ближньої локації для ідентифікації прихованих металів / А. О. Абрамович, В. О. Піддубний // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2018. – С. 176 – 178.

93. Lide D. R., *CRS Handbook of Chemistry and Physics, 87th Edition*, Taylor & Francis: CRC Press : 2007.– 2608 p.

94. Сайфуллин Р. С., Новая таблица Менделеева / Р. С. Сайфуллин, А.Р.Сайфуллин // Химия и жизнь , 2003. – No 12. – С. 14 – 17.

95. Абрамович А. О. Нормування сигналу металоаналізатора для застосування методу лінійного передбачення / А. О. Абрамович // Матеріали науково-технічної конференції "Фізика, електроніка, електротехніка". – Суми. – 2017. – С. 137.

96. Abramovych A. O. Radio engineering system identification of metals on the basis of eddy-current converters / A. O. Abramovych, Y. S. Agalidi, V. O. Piddubnyi // Scientific Bulletin of Zaporizhzhya National Technical University, Radioelektronika, Informatics, Management.– Zaporizhzhia. – 2020. – №1. – P. 7-17. (Web of science) (Web of science) DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-1-1>

97. Abramovych A. O. Eddy-Current Amplitude-Phase Based Method for Identifying Conductive (Metal) Objects / A. O. Abramovych, V. O. Piddubnyi // International scientific and technical journal "Metallophysics and the latest technologies".– Kyiv. – 2020. – Volume 42 No. 8 – P. 1169-1185. (Scopus) URL: <http://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v42/i08/1169.html>

98. Абрамович А.А. Вихретоковая система идентификации металлических объектов / А.А. Абрамович, В.Г. Баженов, В.А. Поддубный // Sciences of Europe. –Praha, Czech Republic. – 2020. – Vol 1. – №56. – p. 44-53. (IndexCopernicus)

Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Статті у наукових фахових виданнях:

1. Абрамович А.О. Металодетектори / А.О. Абрамович, С.М. Дяченко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – Київ. – 2011. – Вип. №46. – С. 186-193.

Здобувачем проведено огляд існуючих методів виявлення металів.

2. Абрамович А. О. Радіолокаційно-вихрострумний радар / А. О. Абрамович // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – Київ. – 2014. – Вип. №57. – С. 77-82.

Здобувачем розроблено теоретичні засади експериментального радіолокаційно-вихрострумного радара, на основі яких була виготовлена експериментальна РСБЛ для проведення вимірювань.

3. Правда В. І. Георадари / В. І. Правда, О. Д. Мрачковський, А. О. Абрамович // Вісник національного університету “Львівська політехніка”, Серія : радіоелектроніка та телекомунікації. – Львів. – 2015. – № 818 – С. 49-54. (**Index Copernicus**)

Здобувачем проведено огляд існуючих георадарів та вказано перспективні напрями їх подальшого розвитку - радіолокаційно-вихрострумний метод..

4. Абрамович А. О. Дихотомічне розрізнення металу на чорний-кольоровий за допомогою спектрального аналізу / А. О. Абрамович, О. Д. Мрачковський, В.Ю. Фурманчук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Сер: Технічні науки. – Житомир. – 2017. – Вип. №1(79). – С. 48-51.

Здобувачем розроблено інформативні ознаки у сигналі радіотехнічної системи ближньої локації для дихотомічного розрізнення металів (за ознакою магнітний / немагнітний).

5. Abramovych A.O. Application of spectral analysis for distinguishing metals by signals from eddy current converters / A.O. Abramovych, V.O. Poddubny // The East European Journal of Advanced Technology. – Kharkiv.– 2017. Vol. 89 (No. 5). P. 51 – 57 DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110177> (**Scopus**)

Здобувачем розроблено інформативні ознаки у сигналі радіотехнічної системи ближньої локації для розрізнення металів в спектральній області в середині підгруп немагнітних та магнітних металів.

6. Абрамович А.О. Дистанційний вихорострумовий аналіз складу металевих об'єктів / А.О. Абрамович, В.О. Піддубний, І.С. Каширський // Міжнародний науково-технічний журнал «Металофізика та новітні технології». – Київ. – 2017. Том.39 Вип. №8. – С. 1035-1049. URL: <http://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v39/i08/1035.html> (**Scopus**)

Здобувачем розроблено інформативні ознаки у сигналі радіотехнічної системи ближньої локації для розрізнення металів в часовій області в середині підгруп немагнітних та магнітних металів та запропоновано метод графічно-цифрових образів.

7. Abramovych A. O. Rationing of signals of eddy – current converters for correct comparison of them / A. O. Abramovych, V. O. Poddubny // Bulletin of the Ternopil National Technical University. Ser: Technical sciences. –Ternopil. – 2017. – Volume 86 (№2). – P.76-83.

Здобувачем розроблено алгоритм пошуку інформативних максимумів в сигналі для його нормування за тривалістю для зручності подальшої обробки.

8. Абрамович А.О. Метод обработки отраженных сигналов вихретоковых импульсных преобразователей / А.О. Абрамович,

В. О. Піддубний, І.С. Каширський // Науковий вісник Запорізького національного технічного університету, Радіоелектроніка, інформатика, управління. – Запоріжжя. – 2017. – Вип. №4. – С.7–14.
DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-4-1> (**Web of science**)

Здобувачем розроблено структурну схему РСБЛ на якій використані спектральний та метод графічно-цифрових образів.

9. Абрамович А.О. Вихрострумний пристрій з базою даних образів для ідентифікації типів металів прихованих об'єктів / А.О. Абрамович, В. О. Піддубний, О. М. Гусяков // Науково технічний журнал "Озброєння та військова техніка". – Київ . – 2017. – №3(15). – С. 51–56.

Здобувачем запропоновано створити базу даних образів металевих виробів, яку можна використовувати при розмінуванні території.

10. Abramovych A. O. Radio engineering system identification of metals on the basis of eddy-current converters / A. O. Abramovych, Y. S. Agalidi, V. O. Piddubnyi // Scientific Bulletin of Zaporizhzhya National Technical University, Radioelektronika, Informatics, Management. – Zaporizhzhia. – 2020. – №1. – P. 7-17. (**Web of science**) DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-1-1>

Здобувачем розглянуто фізичні ефекти та запропоновано пояснення причини виникнення сигналу контролю, який обробляється системою для ідентифікації металів.

11. Абрамович А.О. Вихрострумний амплітудно-фазовий метод ідентифікації провідних (металевих) об'єктів / А. О. Абрамович, В. О. Піддубний // Міжнародний науково-технічний журнал «Металофізика та новітні технології». – Київ – 2020. – Том 42. – Вип. №8. – С. 1169-1185. (**Scopus**) URL: <http://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v42/i08/1169.html>

Здобувачем запропоновано математичну модель, що дозволяє отримати теоретичні сигнали, подібні до експериментально вимірних. Показано перспективи та подальші шляхи розвитку даного моделювання сигналів контролю відгуків від різних металів.

12. Abramovych A. Eddy-current system for identification of metal objects / A. Abramovych, V. Bazhenov, V. Piddubnyi // Sciences of Europe. – Praha, Czech Republic – 2020. – Vol 1. – №56. – p. 44-53. (**IndexCopernicus**)

Здобувачем здійснено порівняння розроблених методів обробки сигналу відгуку. Показано можливості розроблених методів для ідентифікації металів при зашумленні сигналів відгуків.

Свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір:

13. А. с. № 70479 Метод виявлення металевих предметів у діелектричному середовищі / А. О. Абрамович (Україна); заявк. 22.12.2016, опубліковано 16.02.2017

Здобувачем запропоновано метод виявлення металевих предметів у діелектричному середовищі на основі поєднання радіолокаційного та вихрострумового методу обробки сигналу.

14. А. с. № 70945 Спосіб розрізнення металів на чорні та кольорові з використанням коефіцієнтів лінійного передбачення за даними металошукача на основі вихрових струмів: / А.О. Абрамович, С. Я. Жук (Україна); заявк. 24.01.2017, опубліковано 16.03.2017

Здобувачем запропоновано використання методу лінійного передбачення для розрізнення металів за ознакою магнітний / немагнітний по сигналам радіотехнічної системи ближньої локації.

15. А. с. № 73585 Часовий метод виявлення металевих об'єктів у діелектричному середовищі / А.О. Абрамович, В.О. Піддубний, І. С. Каширський (Україна); заявк подано. 20.06.2017, опубліковано 28.08.2017

Здобувачем запропоновано метод графічно-цифрових образів для розрізнення металів в часовій області по сигналам РСБЛ.

Тези доповідей:

16. Абрамович А.О. Модифікована радіотехнічна система ближньої локації для ідентифікації прихованих металів / А. О. Абрамович, В. О. Піддубний // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2018. – С. 176 – 178.

Здобувачем запропонована модифікована РСБЛ.

17. Абрамович А.О. Металодетектори / А.О.Абрамович, С.М. Дяченко // Матеріали V науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Радіоелектроніка в XXI столітті». – Київ. – 2011. – С. 140 – 141.

Здобувачем здійснено огляд існуючих типів металодетекторів та вказано перспективні напрямки – створення радіотехнічної системи ближньої локації для виявлення металів.

18. Абрамович А.О. Вибрані аспекти математичної обробки сигналів георадарів / А.О. Абрамович // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2013. – С. 111 – 112.

Здобувачем запропоновано окремі аспекти по обробці сигналів георадарів.

19. Абрамович А.О. Радіолокаційно-вихрострумний метод обробки сигналів георадарів / А.О. Абрамович // Матеріали науково-технічної конференції "Фізика, електроніка, електротехніка". – Суми. – 2013. – С. 148.

Здобувачем запропоновано поєднання радіолокаційного та вихрострумного методів обробки відбитого сигналу георадара.

20. Абрамович А.О. Радіолокаційно-вихрострумний метод виявлення металів / А.О. Абрамович, І.О. Товкач // Матеріали науково-технічної конференції "Фізика, електроніка, електротехніка". – Суми. – 2014. – С. 167.

Здобувачем запропонована структурна схема радіолокаційно-вихрострумного радара.

21. Абрамович А.О. Георадар для пошуку та класифікації металів / А. О. Абрамович // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. –2014. – С. 144 – 146.

Здобувачем здійснено огляд існуючих георадарів та вказано їх перспективні напрямки в питанні пошуку та класифікації металів.

22. Абрамович А.О. Метод графічних образів в радіотехнічній системі ближньої локації / А.О. Абрамович, І.С. Каширський, В. О. Піддубний // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2018. – С. 173 – 175.

Здобувачем розроблено метод графічно-цифрових образів, що полягає у заміні сигналу в часовій області відповідними його графами амплітуд на основі радіотехнічної системи ближньої локації.

23. Абрамович А. О. Класифікаційна ознака у сигналі георадара, що дозволяє розрізняти конкретний тип металу / А. О. Абрамович // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2015. – С. 142 – 144.

Здобувачем запропонована класифікаційна ознака у сигналі георадара, що дозволяє розрізняти метали.

24. Абрамович А.О. Виявлення в сигналі георадара класифікаційних ознак для розрізнення кольорових металів / А.О. Абрамович // Матеріали науково-технічної конференції "Фізика, електроніка, електротехніка". – Суми. – 2015. – С. 154

Здобувачем розроблена методика визначення класифікаційних ознак у сигналі георадара для розрізнення кольорових металів між собою.

25. Абрамович А.О. Экспериментальное исследование возможности дихотомического различия черных и цветных металлов по данным металлоискателя на основе вихревых токов методом линейного предсказания / А.О. Абрамович, С.Я. Жук, О.Д. Мрачковский // Матеріали міжнародної

науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2016. – С. 14 – 16.

Здобувачем запропоновано використовувати метод лінійного передбачення для дихотомічного розрізнення металів по сигналам радіотехнічної системи ближньої локації.

26. Абрамович А.О. Розпізнавання металевих об'єктів за допомогою аналізу сигналу металошукача в часовій області / А.О. Абрамович // Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій". – Тернопіль. – 2016. – С. 92 – 93.

Здобувачем запропоновано розпізнавати метали на основі аналізу характеристик форми сигналу у часовій області, на основі використання радіотехнічної системи ближньої локації.

27. Абрамович А.О. Металодетектор за принципом дії BFO / А.О. Абрамович // Матеріали IV науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Радіоелектроніка в XXI столітті". – Київ. – 2010. – С. 245-247.

Здобувачем проаналізовано принцип побудови металодетекторів за принципом BFO та вказано перспективні напрямки їх використання .

28. Абрамович А.О. Нормування сигналу металоаналізатора для застосування методу лінійного передбачення / А.О. Абрамович // Матеріали науково-технічної конференції "Фізика, електроніка, електротехніка" – Суми. – 2017. – С. 137.

Здобувачем розроблений алгоритм нормування сигналів радіотехнічної системи ближньої локації для зручного їх порівняння між собою.

29. Абрамович А.О. Вихрострумний металошукач із спектральною обробкою сигналу / А.О. Абрамович, О.Д. Мрачковський, В.О. Піддубний // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2017. – С. 14 – 16.

Здобувачем запропоновано в спектральній області нові інформативні ознаки: площу під обвідною та форму обвідної.

30. Абрамович А.О. Распознавание металлических объектов с помощью анализа временных сигналов / А.О. Абрамович, І.С. Каширський, О. Д. Мрачковський // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2017. – С. 14 – 16.

Здобувачем запропоновано новий інформативний параметр $K\%$ для розрізнення металів в часовій області по сигналам радіотехнічної системи ближньої локації.

31. Абрамович А.О. Накопичення бази даних образів про металеві предмети, як метод підвищення ефективності металошукачів / А.О. Абрамович, В.О. Піддубний, С.А. Цибуля // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції "Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ". – Львів. – 2017. – С. 256 – 257.

Здобувачем запропоновано накопичення бази образів різних металевих виробів для їх аналізу радіотехнічною системою ближньої локації.

Додаток Б. Акти впровадження результатів дисертації

ЗАТВЕРДЖУЮ

ТВО

начальника

Центрального

науково-дослідного інституту озброєння та
військової техніки Збройних Сил України

полковник

В.В. СОТНИК

2018 р.



АКТ

реалізації результатів наукової роботи
Абрамовича Антона Олексійовича

Комісія у складі: голови комісії – начальника науково-дослідного відділу - заступника начальника управління розвитку ОВТ Сухопутних військ, кандидата технічних наук, полковника Ларіна Олександра Юрійовича, та членів комісії: головного наукового співробітника науково-дослідного управління розвитку ОВТ Повітряних сил, доктора технічних наук, професора, працівника ЗС України Довгополого Анатолія Степановича та провідного наукового співробітника науково-дослідного відділу розвитку ОВТ загального призначення, кандидата технічних наук, підполковника Будяну Радугу Георгійовича розглянула матеріали дисертаційних досліджень Абрамовича А.О, а саме: алгоритми послідовного пошуку і обробки інформативних ознак у відбитому сигналі цифрової радіотехнічної системи ближньої локації; метод створення графічно-цифрових образів для дистанційної ідентифікації прихованих металевих об'єктів та аналізу бази даних системи ближньої локації; структурну схему радіотехнічної системи ближньої локації прихованих об'єктів.

Комісія встановила, що наукові результати дисертаційного дослідження використані в науковій діяльності Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України при виконанні науково-дослідної роботи, шифр «Тріонікс», під час проведення аналізу вітчизняних розробок та оцінки науково-промислового потенціалу щодо можливості створення наземних роботизованих комплексів (НРК) для потреб ЗС України, а також у ході обґрунтування технічного вигляду та основних вимог до інженерного НРК та розроблення проекту ТТЗ на створення НРК військового призначення. Акт не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

Голова комісії: полковник

Члени комісії: працівник ЗС України
підполковник

О.Ю. ЛАРІН

А.С. ДОВГОПОЛИЙ

Р.Г. БУДЯНУ



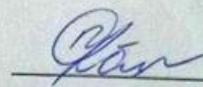
АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
 результатів дисертаційної роботи в навчальний процес Національного
 технічного університету України «Київський політехнічний інститут
 імені Ігоря Сікорського»

Ми, що нижче підписалися, начальник навчально-організаційного управління к.т.н., доц. Яблонський П.М., декан радіотехнічного факультету к.т.н., доц. Антипенко Р.В., завідувач кафедри радіотехнічних пристроїв та систем, д.т.н., проф. Жук С.Я., склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Абрамовича Антона Олексійовича «Аналіз металів цифровою радіотехнічною системою ближньої локації» використовується в навчальному процесі кафедри радіотехнічних пристроїв та систем радіотехнічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», а саме для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»:


- в дисципліні «Математичне моделювання процесів та систем» доповнено розділ «Швидкі моделі аналізу складних систем», тема «Поліноміальні моделі складних систем: лінійні, квадратичні, кубічні, кусково-поліноміальні»;
- в дисципліну «Математичні методи наукових досліджень в телекомунікації та радіотехніці» введено тему «Оптимальні методи апроксимації сигналів за допомогою кусково-поліноміальної моделі».

Ефект від впровадження – підвищення якості навчання та інтенсифікація навчального процесу.

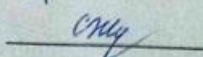
Начальник навчально-організаційного управління

 П.М.Яблонський

Декан радіотехнічного факультету

 Р.В.Антипенко

Завідувач кафедри радіотехнічних пристроїв та систем

 С.Я Жук